



CAIO GUILHERME ELIAS SILVA

**CONTROLE CINEMÁTICO DA TRAJETÓRIA DE UM VANT
APLICADA A PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA**

2ª edição revista, atualizada e ampliada

LAVRAS – MG

2020

CAIO GUILHERME ELIAS SILVA

**CONTROLE CINEMÁTICO DA TRAJETÓRIA DE UM VANT APLICADA A
PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA**

2^a edição revista, atualizada e ampliada

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira

Orientador

LAVRAS – MG

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Caio Guilherme Elias.

Controle Cinemático da Trajetória de um VANT aplicada a Pulverização agrícola / Caio Guilherme Elias Silva. 1^a ed. rev., atual. e ampl. – Lavras : UFLA, 2020.

75 p. : il.

Monografia (graduação)–Universidade Federal de Lavras, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira.

Bibliografia.

1. Pulverização Agrícola. 2. Controle Trajetória. 3. VANT.
I. Vieira, Wander Gustavo Rocha. II. Título.



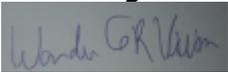
SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

**ATA DE DEFESA DE PRG332 - TCC
G032 - ENGENHARIA MECÂNICA (BACHARELADO)**
(ATA DE DEFESA - PARTE 2 DE 2)

No dia 30/07/2020, às 14h00min, no(a) DEFESA REALIZADA POR VÍDEO CONFERENCIA, nesta universidade, foi realizada a defesa pública de PRG332 - TCC do(a) discente CAIO GUILHERME ELIAS SILVA, matrícula 201420859, com o trabalho intitulado CONTROLE DA TRAJETÓRIA DE UM VANT APLICADA A PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA. Em caso de alteração, o novo título é:

CONTROLE CINEMÁTICO DA TRAJETÓRIA DE UM VANT APLICADA A PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA

A Banca Examinadora, composta por: WANDER GUSTAVO ROCHA VIEIRA (DEG) como presidente(a), FRANCISCO SCINOCCA (DEG) como primeiro(a) membro(a) e CRISTINO DE SOUZA JUNIOR (UTC-HDS) como segundo(a) membro(a); procedeu a arguição, após o término da defesa, os componentes da banca reuniram-se para avaliação e deliberação, considerando o trabalho: aprovado com correções (aprovado; aprovado com correções; reprovado) com nota final: 95 (noventa e cinco). Para constar, eu WANDER GUSTAVO ROCHA VIEIRA lavrei a presente ata, que vai datada e assinada por mim e demais integrantes. Lavras (MG), 30/07/2020.



WANDER GUSTAVO ROCHA VIEIRA



FRANCISCO SCINOCCA



CRISTINO DE SOUZA JUNIOR

Dedico esse trabalho à minha família, que sempre contribuiu muito com a minha bagagem de conhecimentos. Eles foram responsáveis pela maior herança da minha vida: meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado força e saúde para superar as dificuldades.

Agradeço a minha família, que me apoiou de todas as formas possíveis para conseguir realizar este trabalho, sendo base fundamental, com apoio sentimental, moral e financeiro. Essa que me amparou, apostando e crendo que tudo isso é o começo de muitas das minhas futuras realizações.

A meu orientador Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira, que conseguiu me guiar ao decorrer desse percurso com grande maestria, sempre contribuindo para o meu crescimento profissional e pessoal, se demonstrou um grande ser humano e acima de tudo um grande amigo.

A todos os docentes que tive o prazer de ter durante o curso de Engenharia Mecânica, todos vocês contribuíram mais do que imaginam para a formação da pessoa que sou hoje.

Ao laboratório de pesquisa GRUBI, em especial meus orientadores durante os anos de iniciação científica e monitoria João Carlos Giacomini e Tales Heimfarth, graças aos conhecimentos ganhos nesse período, pude descobrir um potencial que nem eu sequer sabia que tinha.

A meus amigos de república e faculdade, que ao fim, se tornaram grandes amigos para a vida.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

(Isaac Newton)

RESUMO

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) para a pulverização agrícola se mostra um método viável quando comparado a outros métodos utilizados hoje em dia. Em relação a pulverização terrestre, a utilização de VANTs oferece maior rapidez e evita a perda das sementes por esmagamento da cultura. Em comparação a pulverização aérea por meio de aeronaves tripuladas, oferece um controle mais eficiente, evitando assim o desperdício do defensivo devido a deriva. Vale ressaltar que o uso de VANTs é mais seguro devido ao melhor controle sobre a aeronave, assim como a ausência da necessidade de pilotos. Atualmente, a pulverização consiste em duas etapas recorrentes: Passagem de pulverização e manobra de retorno, chamado de balão. Um processo de pulverização eficiente é aquela que minimiza o tempo de balão e maximiza o tempo de pulverização. Nesse trabalho foi proposto a análise de diferentes estratégias de passagens que minimizam a distância de retorno por meio da determinação da melhor trajetória de um VANT durante a pulverização. O cenário escolhido para estudo foi de uma área conhecida e regular. Para o estudo da área a ser pulverizada, foi levado em consideração os seguintes parâmetros: Dimensão da área a ser pulverizada, discretização da área feita de maneira uniforme, velocidade constante e aceleração fixada em $3g[m/s^2]$, isto é, 3 vezes a aceleração da gravidade. Afim de analisar o problema, foi implementado um algoritmo capaz de gerar trajetórias em *Progressive Pass* e *Round Robin* para o cenário proposto. Para o desenvolvimento dos algoritmos foi preciso considerar as limitações físicas da aeronave, afim de aproximar o máximo possível as simulações da realidade. O algoritmo para o *Progressive Pass* gera uma trajetória linear sequencial capaz de evitar obstáculos fixos, neste tipo de trajetória, a distância de retorno é fixa. Para o *Round Robin* o algoritmo se comporta de maneira similar, alterando apenas as manobras de balão, que passam variar a cada passo da pulverização. Ao gerar essas trajetórias, o algoritmo utiliza três tipos de manobras comuns durante o voo de pulverização, *U-Turn*, *Gap-Turn*, *Omega-Turn*. A diferença entre cada manobra se dá basicamente em seus parâmetros de aplicação, sendo eles os seguintes: a manobra *U-Turn* é utilizada quando a distância de retorno é pelo menos duas vezes maior que o raio de curvatura da aeronave, a manobra *Omega-Turn* é executada quando a distância de retorno é menor que duas vezes o raio de curvatura da aeronave, já a manobra *Gap-Turn* acontece em situações especiais quando a distância de retorno é exatamente igual a duas vezes o raio de curvatura da aeronave. A trajetória em *Round Robin* pode se comportar de diversas maneiras, neste trabalho foi estudado todos os tipos possíveis de se usar a manobra *Round Robin* para o cenário proposto, podendo ao final fazer um comparativo entre todas as trajetórias geradas. Ao final do trabalho foi encontrado a trajetória que reduza os tempos improdutivos durante a pulverização para o cenário de estudo. Como forma de verificar o comportamento do VANT para as trajetórias geradas, foi implementado um algoritmo capaz de realizar simulações gráficas.

Palavras-chave: Pulverização Agrícola. Controle Cinemático Trajetória. VANT. Algoritmo de cobertura de Área. Otimização de Trajetória.

ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for agricultural spraying proves to be a viable method when compared to other methods used today. In relation to land spraying, the use of UAVs offers greater speed and prevents the loss of seeds by crushing the crop. In comparison to aerial spraying by means of manned aircraft, it offers more efficient control, thus avoiding the waste of the pesticide due to drift. It is worth mentioning that the use of UAVs is safer due to better control over the aircraft, as well as the absence of the need for pilots. Currently, spraying consists of two recurring steps: Spray pass and return maneuver, called a balloon. An efficient spraying process is one that minimizes balloon time and maximizes spraying time. In this work, it was proposed the analysis of different pass strategies that minimize the return distance by determining the best UAV trajectory during spraying. The scenario chosen for the study was a known and regular area. For the study of the area to be sprayed, the following parameters were taken into account: Dimension of the area to be sprayed, discretization of the area made uniformly, constant speed and acceleration fixed at $3g$ [m/s^2], that is, 3 times the acceleration due to gravity. In order to analyze the problem, an algorithm capable of generating trajectories in Progressive Pass and Round Robin for the proposed scenario was implemented. For the development of the algorithms it was necessary to consider the physical limitations of the aircraft, in order to bring the simulations as close to reality as possible. The algorithm for the Progressive Pass generates a sequential linear path capable of avoiding fixed obstacles, in this type of path, the return distance is fixed. For Round Robin, the algorithm behaves in a similar way, changing only the balloon maneuvers, which change with each spraying step. When generating these trajectories, the algorithm used three types of common maneuvers during the spray flight, U-Turn, Gap-Turn, Omega-Turn. The difference between each maneuver is basically based on its application parameters, which are as follows: the U-Turn maneuver is used when the return distance is at least twice the radius of curvature of the aircraft, the Omega-Turn maneuver is performed when the return distance is less than twice the aircraft's radius of curvature, whereas the Gap-Turn maneuver occurs in special situations when the return distance is exactly equal to twice the aircraft's radius of curvature. The trajectory in Round Robin can behave in several ways, in this work we studied all possible types of using the Round Robin maneuver for the proposed scenario, being able to make a comparison between all the trajectories generated. At the end of the work, it was found the trajectory that reduces the unproductive times during the spraying for the study scenario. As a way of verifying the behavior of the UAV for the generated trajectories, an algorithm capable of performing graphic simulations was implemented.

Keywords: Agricultural spraying. Kinematic Control Trajectory. UAV. Area coverage algorithm. Trajectory optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Funcionamento A*	21
Figura 3.2 – Padrão de cobertura: (a)adjacente e (b) não adjacente.	23
Figura 3.3 – Exemplificação de um problema TSP em que a trajetória de menor distância é dada por $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow A$	24
Figura 3.4 – Manobras de retorno: (a) $\Omega - Turn$, (b) $\Pi - Turn$ e (c) $T-turn$	24
Figura 3.5 – Aplicação do problema TSP em uma pulverização agrícola	25
Figura 3.6 – Blocos tradicionais de caminho adotados para a pulverização: (a) bl(3) com três caminhos por bloco e (b) bl(5) com cinco caminhos por bloco.	26
Figura 3.7 – Localização dos campos de cultivos aplicados como cenários de teste.	27
Figura 3.8 – Ferramenta de navegação agrícola <i>Skymap</i>	28
Figura 3.9 – Formato das áreas de pulverização suportados pelo <i>Skymap</i>	28
Figura 3.10 – Trajetória geradas pelo <i>Skymap</i> : A - <i>Skip Back to Back</i> (SBK); B - <i>Skip Back to Back</i> (SBK); C - <i>Racetrack</i> (RCT); D - <i>Quick Racetrack</i> (QKR); E - <i>Reverse Racetrack</i> (RVR); F - <i>Squeeze</i> (SQZ); G - <i>Expand</i> (XPN).	29
Figura 4.1 – Problema básico de planejamento de trajetória	30
Figura 4.2 – Trajetória em <i>Progressive Pass</i>	32
Figura 4.3 – Passos para a trajetória em <i>Progressive Pass</i>	33
Figura 4.4 – Trajetória em <i>Round Robin</i>	33
Figura 4.5 – Manobra <i>Omega-turn</i>	35
Figura 4.6 – Manobra <i>U-turn</i>	36
Figura 4.7 – Manobra <i>Gap-turn</i>	36
Figura 5.1 – Estrutura da metodologia seguida.	37
Figura 5.2 – Cenário com obstáculo.	38
Figura 5.3 – Representação em caixa preta da heurística base.	40
Figura 5.4 – Ilustração do funcionamento da heurística base.	40
Figura 5.5 – Fluxograma do funcionamento da heurística base.	41
Figura 5.6 – Representação em caixa preta da heurística levando em consideração fatores físicos da aeronave.	42
Figura 5.7 – Ilustração da heurística <i>Progressive Pass</i>	43
Figura 5.8 – Influência do raio de curvatura na quantidade de área não pulverizada.	45
Figura 5.9 – Ilustração da heurística <i>Round Robin</i>	46

Figura 5.10 – Cenário sem obstáculo.	47
Figura 5.11 – Representação em caixa preta da heurística de otimização.	48
Figura 5.12 – Discretização simplificado a área de trabalho.	50
Figura 5.13 – Trajetória em <i>Progressive Pass</i> pelo algoritmo de otimização.	51
Figura 5.14 – Trajetória em <i>Round Robin</i> Extremos pelo algoritmo de otimização.	52
Figura 5.15 – Trajetória em <i>Round Robin</i> 2:1 pelo algoritmo de otimização.	52
Figura 5.16 – Trajetória em <i>Round Robin</i> 3:2 pelo algoritmo de otimização.	53
Figura 6.1 – Área Pulverizada X Velocidade de Voo - <i>Progressive Pass</i>	55
Figura 6.2 – Tempo de Voo X Velocidade de Voo - <i>Progressive Pass</i>	56
Figura 6.3 – Tempo de Voo X Área Pulverizada - <i>Progressive Pass</i>	56
Figura 6.4 – Distância Percorrida X Velocidade de Voo - <i>Progressive Pass</i>	57
Figura 6.5 – Área Pulverizada X Velocidade de Voo - <i>Round Robin</i>	58
Figura 6.6 – Tempo de Voo X Velocidade de Voo - <i>Round Robin</i>	59
Figura 6.7 – Tempo de Voo X Área Pulverizada - <i>Round Robin</i>	60
Figura 6.8 – Distância Percorrida X Velocidade de Voo - <i>Round Robin</i>	61
Figura 6.9 – Tempo de Voo por trajetória - Otimização <i>Round Robin</i>	64
Figura 6.10 – Velocidade de Voo por trajetória - Otimização <i>Round Robin</i>	65
Figura 6.11 – Distância percorrida por trajetória - Otimização <i>Round Robin</i>	66
Figura 6.12 – Animação gráfica <i>Round Robin</i> Extremos.	68
Figura 6.13 – Animação gráfica <i>Round Robin</i> 3:2.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Utilidades dos VANTs na Agropecuária.	13
Tabela 1.2 – Comparativo entre a pulverização terrestre, área tripulada e área não tripulada.	14
Tabela 3.1 – Resultados obtidos das distâncias percorridas durante a execução das manobras de retorno.	27
Tabela 5.1 – Comparativo A* VS Heurística Base.	41
Tabela 5.2 – Comparativo das Heurísticas Implementadas.	49
Tabela 6.1 – Resultados obtidos para <i>progressive pass</i>	54
Tabela 6.2 – Resultados obtidos para <i>round robin</i>	58
Tabela 6.3 – Dados obtidos para as trajetórias <i>Progressive Pass</i> e <i>Round Robin</i> em um cenário sem obstáculos	62
Tabela 6.4 – Dados obtidos pelo algoritmo de otimização.	63
Tabela 6.5 – Resultados da otimização.	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Pulverização terrestre X aérea tripulada X aérea não tripulada	13
1.2	Motivações e Justificativas	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Propostas de solução para a geração de trajetórias	17
3.2	Planejamento para cobertura de área	18
3.3	Algoritmos geradores de trajetória na agricultura utilizados atualmente	19
3.4	Algoritmo <i>A-star</i>	21
3.5	Algoritmos geradores de trajetória em uma pulverização terrestre	22
3.6	O uso de DGPS para a pulverização agrícola aérea	28
4	REFERENCIAL TEÓRICO	30
4.1	Planejamento de uma trajetória	30
4.2	Tipos de trajetória durante a pulverização	31
4.2.1	<i>Progressive Pass</i>	32
4.2.2	<i>Round Robin</i>	33
4.3	Tipos de manobras de retorno	34
4.3.1	<i>Omega-turn</i>	34
4.3.2	<i>U-turn</i>	35
4.3.3	<i>Gap-turn</i>	36
5	METODOLOGIA	37
5.1	Cenário com obstáculo	38
5.1.1	Heurísticas Adotadas	39
5.1.2	Heurística <i>Progressive Pass</i>	42
5.1.3	Heurística <i>Round Robin</i>	45
5.2	Cenário sem obstáculo	47
5.2.1	Funcionamento geral da heurística de otimização	48
5.2.2	Otimização das trajetórias	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54

6.1	Cenário com obstáculo	54
6.1.1	<i>Progressive Pass</i>	54
6.1.2	<i>Round Robin</i>	58
6.2	Cenário sem obstáculo	61
6.2.1	Otimização da trajetória	63
6.2.2	Animação Gráfica	68
7	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Segundo Bongaarts (2018) , o número de pessoas que sofrem por falta de alimento vem crescendo nos últimos 3 anos, retornando a níveis que se comparam aos números de uma década atrás. Neste cenário, o uso da pulverizantes agrícolas vem se tornando cada vez mais importante quando se trata do aumento de eficiência durante a produção de alimentos.

A pulverização agrícola se dá na aplicação de defensivos em regiões de interesse como forma de eliminar possíveis pragas. No entanto, o controle deficiente durante aplicação leva a um desperdício do defensivo devido a ação do vento sobre o agrotóxico, essa dispersão do defensivo para outras regiões fora a de interesse é chamado de deriva. Além do desperdício, a deriva do agrotóxico pode causar problemas relacionados a saúde devido a possível contaminação de lenções freáticos ou até mesmo pelo simples contato direto da toxina com pessoas próximas a região.

O termo Agricultura de Precisão, utilizado no Brasil, e em outros países como *Precision Agriculture* e *Precision Farming* (TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002), consiste na implementação de um sistema de produção que busca a aplicação de insumos agrícolas de forma precisa, ou seja, somente em áreas que identifique a necessidade de nutrientes e/ou defensivos, é uma "filosofia de gerenciamento agrícola baseado em informações exatas, precisas e se completa com decisões exatas"(ROZA, 2000; TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002).

Atualmente procura-se aumentar o nível de produção, sem aumentar a área de plantio. Para isso, um novo método de precisão vem sendo utilizado dentro da agricultura de precisão, são os drones e/ou VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados). Tal utilização se fortaleceu pelos recentes avanços na tecnologia da computação e desenvolvimento de sistemas globais de navegação e geoprocessamento. Estas aeronaves portam sensores e recursos de imagem eficientes e precisos, colaborando com danos na lavoura e índice de crescimento, por exemplo (UEYAMA; FAIÇAL, 2016).

Segundo Bastos (2015), o uso de VANTs é um investimento com retorno garantido devido a sua grande versatilidade. A Tabela 1.1 exemplifica as possíveis atividades que podem ser executados por VANTs.

Tabela 1.1 – Utilidades dos VANTs na Agropecuária.

Descrição	Função
Análise da Plantação	Detectar pragas e doenças, falhas plantio
Demarcação do Plantio	Detectar a melhor área para o plantio
Acompanhar o desenvolvimento da safra	Monitorar o desenvolvimento da lavoura
Pulverização	Aplicação de fertilizantes e/ou defensivos
Acompanhamento de Pastagem	Identificar necessidade de reforma
Monitorar Desmatamento	Localização de focos de desmatamento
Achar nascentes de água	Em locais de difícil acesso
Descobrir onde abrir estradas	Identificar coordenadas em matas fechadas
Vigilância	Monitoramento de divisas
Achar focos de incêndios	Controlar os focos de Incêndio
Telemetria	Medição das propriedades
Tocar boiada	Experimentos estão sendo realizados
Contar a boiada	Através das imagens aéreas
Busca de animais perdidos	Agilidade na localização
Facilita a venda da propriedade	Através das imagens aéreas

Fonte: (BASTOS, 2015, Adpatado)

O presente trabalho tem como foco a pulverização, onde o uso de VANTs implicariam em uma maior eficiência na aplicação de fertilizantes e/ou defensivos, resultando assim em um aumento de produtividade nas lavouras.

1.1 Pulverização terrestre X aérea tripulada X aérea não tripulada

A pulverização hoje em dia é feita basicamente por dois meios: terrestre e aérea tripulada.

A pulverização terrestre possui as seguintes limitações:

- Aplicação deficitária do defensivo em terrenos não regulares, causando assim o problema de deriva;
- O colaborador está em contato direto com o agrotóxico, podendo causar diversos problemas relacionados a saúde;
- Tempo de aplicação do defensivo elevado, no qual o uso em áreas grandes se tornariam inviáveis.

Com relação a pulverização através de aeronaves tripuladas, temos os seguintes fatores:

- Risco elevado para o colaborador, além de estar em contato direto com defensivo, ainda há risco de colisão da aeronave, pois para se minimizar o problema da deriva, a aeronave necessita sobrevoar em baixas altitudes e em altas velocidades;
- Há um limite de baixa altitude que aeronave deve respeitar, devido suas propriedades físicas (velocidade voo, aceleração, envergadura da asa, etc);
- Aeronaves tripuladas necessitam de uma maior velocidade de voo, logo, há a necessidade de se fazer manobras maiores.

Comparado as duas outras formas existentes atualmente, o uso de VANTs possui as seguintes vantagens que serão melhor abordadas ao decorrer do relatório:

- Aumenta da eficiência durante a pulverização, aplicação do defensivo em áreas de difícil acesso;
- Aumento da segurança;
- Maior controle sobre a aeronave, uso de manobras menores;
- Aumento da quantidade de pesticida presente na aeronave, devido a ausência do piloto.

A Tabela 1.2 ilustra os possíveis pontos positivos e negativos para cada método de pulverização abordados anteriormente.

Tabela 1.2 – Comparativo entre a pulverização terrestre, área tripulada e área não tripulada.

Situação	Método de pulverização		
	Terrestre	Aérea Tripulada	Aérea Não Tripulada
Esmagamento da semente	Alto	-	-
Deriva do defensivo	Baixo	Alto	Baixo
Tempo de Aplicação	Alto	Médio	Baixo
Risco ao colaborador	Médio	Alto	Baixo
Controle durante a pulverização	Baixo	Baixo	Alto
Quantidade de defensivo transportada	Baixo	Médio	Alto
Viabilidade de aplicação em grandes áreas de pulverização	Baixo	Alto	Alto
Gasto de combustível	Alto	Alto	Baixo

Fonte: Autor

1.2 Motivações e Justificativas

Tento em mente as possíveis vantagens do uso de VANTs, a motivação do presente trabalho pode-se ser dividida em dois grupos:

- Aumento contínuo da demanda agrícola;
- Redução drástica do risco para o piloto.

Com relação à demanda, as projeções populacionais indicam crescimento acelerado e contínuo nas próximas décadas, o que deve elevar a demanda de alimentos em geral. A população mundial em 2024 será superior a 8 bilhões de pessoas e, em 2050, superior a 9,5 bilhões. Tais números representam crescimento de 13,16% de 2012 a 2024 e de 34,90% entre 2012 e 2050 (ONU, 2012). Devido a este grande aumento na demanda de alimentos, se faz necessário o uso de novos métodos como forma de ampliar a produção agrícola e suprir as necessidades atuais e futuras.

A pulverização por meio de aviões tripulados geralmente causa o contato direto do colaborador com o defensivo. Mesmo com o uso de proteção, como máscaras, os colaboradores ficam expostos ao produto, que pode provocar sérios problemas de saúde como câncer e efeitos adversos. A quantidade e local de agroquímicos aplicado nas lavouras, é algo de difícil controle, já que a pulverização quase sempre está sujeita a fatores meteorológicos, como velocidade e direção do vento, que podem comprometer a aplicação na área de cultivo, espalhando-o por áreas vizinhas (UEYAMA; FAIÇAL, 2016). O uso de VANTs resolve de maneira direta esse problema, pois o colaborador não mais estará em contato direto com o agente químico e ainda mais, oferecerá um maior controle durante a aplicação, podendo sobrevoar a área com altitudes menores, evitando assim a deriva do agrotóxico.

Ainda com relação a segurança do piloto, outro fator risco está no próprio uso da aeronave tripulada, pois ao se pulverizar uma área qualquer, o piloto necessita sobrevoar o local em altitudes muito baixas, em velocidades altas e altas cargas inercias. Qualquer descuido ao realizar uma manobra, pode levar a um acidente fatal.

Como já mencionado, o uso de VANT para pulverização agrícola é amplo, podendo ser utilizado em diferentes tipos de campos. Para o trabalho em questão, foi estudado seu uso apenas para campos regulares

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar e otimizar a trajetória de um VANT durante a pulverização, considerando um ambiente regular conhecido.

2.2 Objetivos Específicos

1. Fazer um estudo bibliográfico sobre os tipos abordagens já utilizados atualmente;
2. Definir os cenários de trabalho;
3. Realizar a implementação de um algoritmo capaz de determinar a trajetória, levando em consideração alguns parâmetros da aeronave;
4. Através da trajetória gerada, verificar a eficiência da pulverização em relação ao tempo de voo e área pulverizada;
5. Implementar um algoritmo capaz de otimizar a trajetória gerada;
6. Determinar e otimizar a melhor trajetória para o cenário estabelecido;
7. Criar um algoritmo capaz de realizar simulações gráficas, afim de se verificar o comportamento do VANT para a trajetória gerada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O controle de trajetória durante a pulverização agrícola a muito vem sendo discutido dentro da comunidade acadêmica. Estudos como os realizados por UHEYAMA (2016), indicam a viabilidade de se trabalhar drones na agricultura. Nas seções seguintes serão apresentados estudos sobre:

- As características dos algoritmos geradores de trajetória;
- O planejamento durante a cobertura de uma área;
- Os algoritmos geradores de trajetória utilizados atualmente na agricultura;
- O algoritmo A-star(A*);
- O uso de algoritmos ótimos para a redução de tempos improdutivos durante a pulverização agrícola por meio terrestre;
- Uso de DGPS (*Differential Global Positioning System*) em uma pulverização agrícola aérea.

3.1 Propostas de solução para a geração de trajetórias

O planejamento de trajetórias de voo para uma única aeronave não tripulada deve ser sempre segura e possível de se realizar. Portanto, a aeronave deve ser capaz de transpor todos os obstáculos, conflitos em potencial e ameaças de forma a respeitar seus limites físicos com uma margem de erro aceitável.

Tendo isso em mente, Yang e Zhao (2004) definiram alguns critérios que a solução desenvolvida deve seguir.

1. **Completeness:** O método de solução é completo se ele sempre é capaz de encontrar uma trajetória possível se existir uma;
2. **Complexidade de tempo e espaço:** O método deve ser capaz de encontrar uma solução em um limite de tempo aceitável e com recursos computacionais limitados.
3. **Robustez:** O método deve fornecer soluções que um alto nível de confiabilidade;
4. **Otimização:** A solução deve ser capaz de encontrar a melhor trajetória disponível;

5. **Flexibilidade:** O método de solução é considerado flexível, se o mesmo for capaz de gerar trajetórias em diversos tipos de cenários.

A solução ideal deve ser capaz de satisfazer todos os cinco critérios acima.

Os métodos de solução podem ser divididos em dois grupos: otimização contínua e busca discreta (YANG; ZHAO, 2004).

O método desenvolvida por otimização contínua admite um número infinito de soluções possíveis, e justamente por ser uma trajetória gerada de forma contínua no tempo, as manobras da aeronave são bastantes suaves e sempre possíveis de serem realizadas. Em contraponto, devido ao grande número de soluções possíveis, sua resolução é feita de maneira numérica. O método de solução numérico depende diretamente de boas condições de contornos, no qual não se tem garantia de convergência e podem levar muito tempo para se obter os resultados.

O método de busca discreta deve ser capaz de determinar a solução ótima em um conjunto finito de soluções possíveis, e definido a essa quantidade limitada de soluções. Essa metodologia é capaz de garantir um certo grau de confiabilidade de convergência em um tempo de resposta muito menor quando comparado os método de otimização contínua. No entanto, a qualidade da trajetória gerada, está diretamente ligada a qualidade da discretização feita. Assim as manobras realizadas pela aeronave, podem não ser tão suáveis e de difícil realização.

O presente trabalho faz uso do método de busca discreta, onde os motivos dessa escolha serão tratados nas seções futuras.

3.2 Planejamento para cobertura de área

Planejamento para cobertura de área pode ser usado em diversas aplicações como limpeza de pisos, corte de grama, remoção de minas, pesquisa subaquática, entre outros. Devido a esse grande potencial de desenvolvimento, seu uso vem se tornando cada vez mais alvo de pesquisas em todo o mundo (CAO; HUANG; HALL, 1988).

Segundo Cao, Huang e Hall (1988), o desenvolvimento de um algoritmo que controle um robô móvel deve ter como base os seguintes critérios:

1. O robô deve ser capaz de cobrir toda a área proposta;
2. O robô deve preencher a região sem sobrepor os caminhos de sua trajetória;
3. A operação deve ser contínua e sequencial sem ocorrer repetições de trajetória;

4. O robô deve ser capaz de transpor obstáculos caso eles existam;
5. Uso de movimentos simples durante a execução da trajetória, sendo composto por percursos retos ou circulares, devem ser usados como forma de simplificar o controle;
6. Uma solução "ótima" é desejável sob as condições disponíveis.

Nem sempre é possível satisfazer todos os critérios em ambientes complexos, as vezes é necessário definir prioridades (CAO; HUANG; HALL, 1988). Isso se torna ainda mais verdadeiro quando aplicado ao caso de campos de agricultura, no qual muitos deles apresentam geometrias complexas onde a chave para a cobertura dessas áreas está na definição de prioridades.

Um exemplo de algoritmo comum para a cobertura de áreas é uma variação do problema do caixeiro viajante. O problema tenta determinar a menor rota para percorrer uma série de cidades (visitando uma única vez cada uma delas) e retornando à cidade de origem (ARKIN; HASSIN, 1994; CHOSET, 2001). Esse é um problema de otimização NP-difícil, devido a isso, sua solução necessita de um tempo computacional relativamente alto.

Como forma de simplificar problemas complexos como o do caixeiro viajante, muitas das vezes são usados algoritmos não exatos, que diminuem de maneira drástica o tempo de solução do problema. Basicamente um algoritmo pode ser classificado em três classes: algoritmos de aproximação, de semi aproximação e exatos (CHOSET, 2001; LATOMBE, 1991).

Outra maneira de se classificar algoritmos é de maneira *offline* e *online*. Algoritmos *Offline* dependem apenas de informações estacionárias, e o ambiente de trabalho é tratado como conhecido. Normalmente algoritmos *online* necessitam que o ambiente em análise seja adaptado com o uso de sensores, por exemplo.

Os algoritmos desenvolvidos neste trabalho apresentam características de um algoritmo de aproximação *offline*. Preferiu-se implementar um algoritmo com essas características devido aos parâmetros escolhidos de estudo, no qual é focado em uma região previamente conhecida e no uso de VANTs, em que necessitam de tempos de processamento baixos.

3.3 Algoritmos geradores de trajetória na agricultura utilizados atualmente

Existem estudos que já analisaram a eficiência de trajetórias durante a pulverização agrícola por meios terrestres. A sobreposição de rotas devido a imprecisão no controle do veículo chegam a resultar em um acréscimo de cerca 9% da largura total da área de estudo (PALMER,

1984). Outro fator que contribui para uma pulverização ineficiência é a forma em que se é executada as manobras para se evitar obstáculos (PALMER; WILD; RUNTZ, 1988).

Palmer, Wild e Runtz (2003) realizaram um estudo que analisou as rotas executadas por veículos pulverizadores com a utilização de sistemas de posicionamento. Esse estudo concluiu que 16% da distância executada poderia ter sido reduzida.

Devido essa necessidade de aprimoramento na eficiência durante a pulverização, surgiram muitas outras publicações que focaram no aprimoramento da geração e execução de trajetórias.

Um método de otimização nas rotas de veículos pulverizadores é por meio do uso de grafos (SØRENSEN; BAK; JØRGENSEN, 2004). Esse método divide a área em pequenos nós criando subdivisões do campo de trabalho (STOLL, 2003). Essa abordagem é útil em campos complexos não regulares.

Outra abordagem possível é a cobertura da área a ser pulverizada por meio aleatório. Esse é o método utilizado pelos robôs limpadores de chão. Se esse método é capaz de percorrer toda a área se for executado por tempo bastante (BALCH, 2000; CHOSET, 2001). Embora seu tempo de execução possa ser elevado quando comparado a outros métodos, esse método tem como ponto positivo de utilizar um algoritmo *online* que utiliza poucos sensores (necessários para definir as fronteiras) (BALCH, 2000).

Algoritmos genéticos também podem ser usados para solução desse tipo de problema. Nessa abordagem, o campo é representado em formato de grade e a rota que cobrirá essa grade é realizada através de uma sequência de células em que a roda deve seguir (RYERSON; ZHANG, 2007). O algoritmo genético é aplicado para encontrar a mínima distância e a máxima área coberta.

Outro algoritmo que possui características similares é o Dijkstra's. Este algoritmo é capaz de encontrar o caminho de menor custo, isto é, o caminho de menor distância percorrida, dentro de um cenário de diversos possíveis caminhos. Esse tipo de algoritmo é conhecido como SPF (*Shortest Path First*) (JAVOID, 2013).

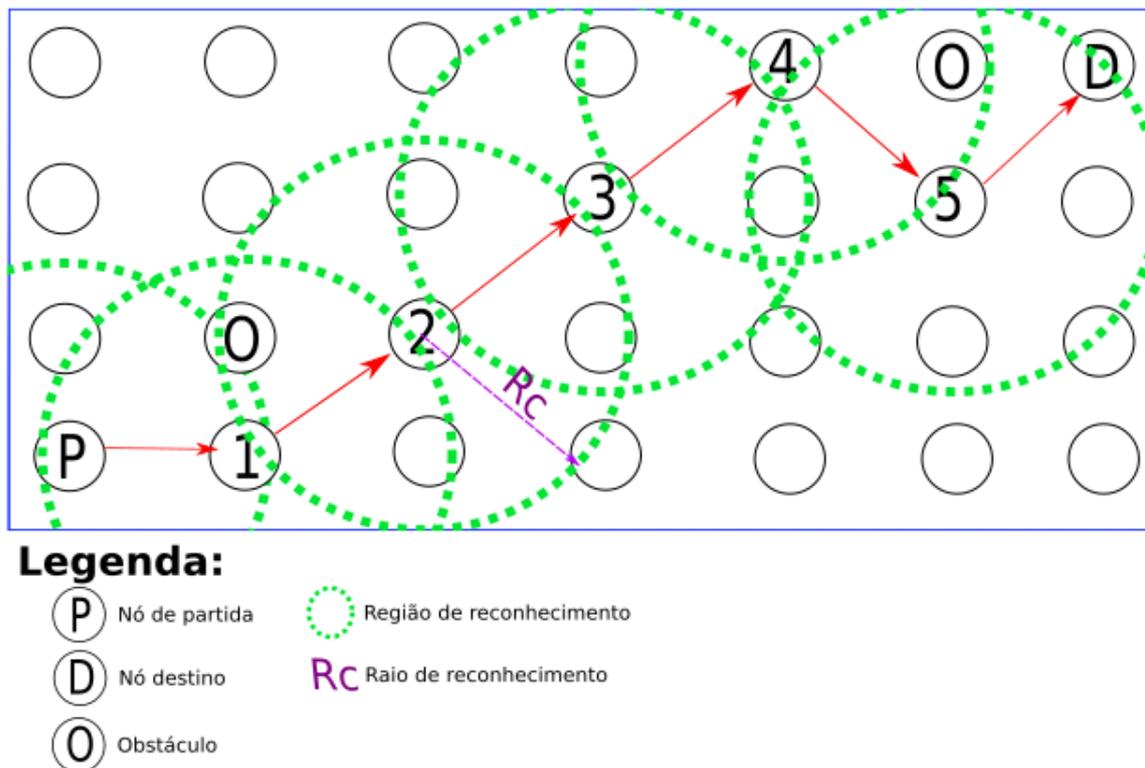
Concluindo, pode-se dizer que o planejamento de rotas capaz de realizar a completa cobertura de uma área ainda está nos estágios de pesquisa e uma solução ótima através de um algoritmo universal ainda não foi desenvolvido.

O presente trabalho surge como forma de contribuir para recentes pesquisas nessa área. O algoritmo implementado se baseia no algoritmo de busca *A-star*, que utiliza uma abordagem que possui características de algoritmo genético e grafos.

3.4 Algoritmo *A-star*

Existem diversos algoritmos de geração de trajetória em um ambiente discretizado. Um dos mais utilizados é o algoritmo de busca *A-star* (A^*). Este é um algoritmo ótimo, logo, dentro das possibilidades conhecidas, ele sempre irá retornar a melhor solução para aquela situação, a solução ótima do problema (ZANCHIN, 2018). A Figura 3.1 ilustra seu funcionamento.

Figura 3.1 – Funcionamento A^*



Fonte: Autor

No algoritmo *A-star* inicialmente define-se um raio de reconhecimento e um nó de partida. A partir do nó de partida é selecionado todos os nós que estão dentro desta região, nos quais tais nós são chamados de nós vizinhos. Assim, o algoritmo é capaz de encontrar o nó mais próximo do nó destino que não for um obstáculo. Esse nó é selecionado como próximo caminho a se seguir, e o mesmo torna-se o novo nó de partida reiniciando o processo até que se chegue no nó destino.

O uso do algoritmo A-Star para a geração de trajetórias de VANTs a muito vem sendo estudado no meio acadêmico. Este tipo de algoritmo é capaz de calcular a trajetória de menor custo em um cenário desconhecido (LI; SUN, 2008).

Este trabalho, utilizou-se de uma modificação do algoritmo A* para que fosse possível aplicar o conceito do método em uma pulverização agrícola levando em consideração os parâmetros tratados nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3.

Esta monografia tem como foco de estudo a pulverização de uma determinada área, portanto, sair de um ponto A para chegar em um ponto B não seria o bastante para cumprir o objetivo proposto. Dessa forma foi necessário adapta-lo para que fosse capaz de repetir o processo de partida e chegada afim de cobrir toda a região a ser pulverizada. Outras alterações foram realizadas ao código original do algoritmo de busca *A-star*, essas alterações serão melhores tratadas na Seção 5.1.1.

3.5 Algoritmos geradores de trajetória em uma pulverização terrestre

A eficiência de uma pulverização terrestre realizada sem o auxílio de aparelhos de navegação depende diretamente da experiência do operador. Segundo a ASAE (2005), *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, a eficiência em uma pulverização agrícola terrestre é dada pela razão entre a produtividade da máquina sobre as condições do campo em que ela está sendo aplicada e o valor da produtividade máxima teórica.

Grande parte da perda de eficiência em uma pulverização se dá nos tempos improdutivos. Uma grande porção desses tempos improdutivos são gerados durante a execução das manobras de retorno (HANSEN; HORNBAKER; ZHANG, 2003; TAYLOR; SCHROCK; STAGGENBORG, 2002).

As manobras de retorno são executadas nos momentos em que o veículo necessita retornar a área de pulverização e quando mal executadas podem afetar as condições do solo e aumentar o gasto de combustível (KELLER, 2005).

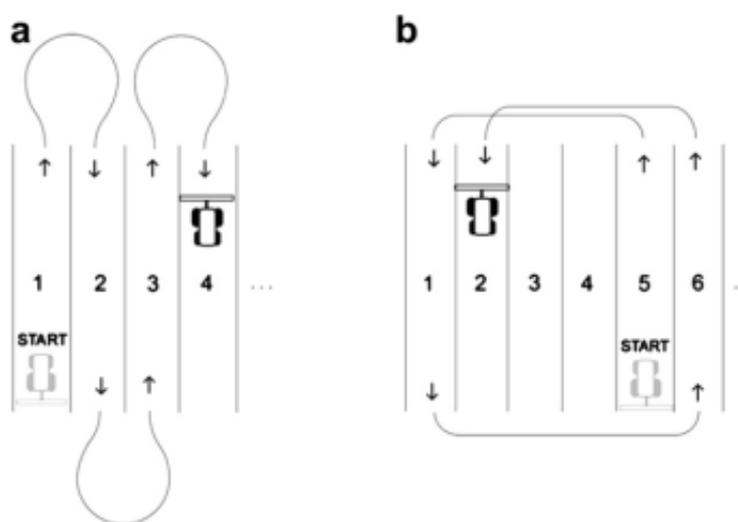
Recentemente, pesquisas voltadas para o planejamento de trajetórias de máquinas agrícolas vem tendo bastante foco afim de se aumentar a eficiência durante a pulverização. Dois tipos de algoritmos de planejamento de trajetória para a pulverização agrícola foram apresentados por Oksanen (2007):

- Algoritmo *Off-line*: que utilizam-se da abordagem *top-down*, através da divisão de regiões complexas em pequenas regiões simplificadas.

- Algoritmo *On-line*: aplicam a metodologia *bottom-up*, fazendo-se uso de previsões e métodos de busca.

O estudo apresentado por Bochtis e Vougioukas (2008) faz-se uso desses tipos de algoritmos com o objetivo de reduzir o tempo não produtivo em uma pulverização agrícola por meio terrestre. A Figura 3.2 ilustra os dois tipos de padrões aplicados por Bochtis e Vougioukas (2008).

Figura 3.2 – Padrão de cobertura: (a)adjacente e (b) não adjacente.



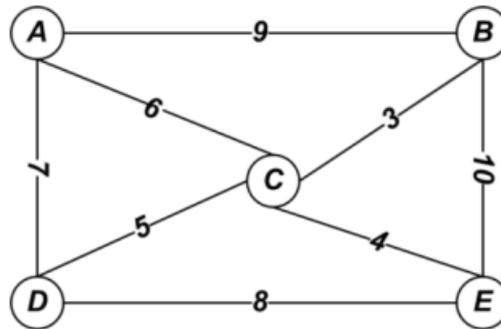
Fonte: (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008)

Se tratando do tempo gasto durante a manobra de retorno, alguns padrões de cobertura de área são melhores que outros. Isso ocorre pois a realização da manobra depende do raio de retorno do veículo e da distância para o próximo caminho a ser pulverizado. Vale ressaltar também que o ponto de partida e destino, dependem da sequência de cobertura que será executada.

Como forma de implementar um algoritmo capaz de gerar uma trajetória que minimize os tempos improdutivos durante a pulverização agrícola terrestre, Bochtis e Vougioukas (2008) utilizam o problema do caixeiro viajante, TSP (*travelling salesman problem*), como base de implementação de seu algoritmo.

O problema do caixeiro viajante ou TSP, é uma representação de uma grande classe de problemas de otimização combinatória. TSP em sua forma regular, é dado por um mapa de cidades dados a um caixeiro viajante em que necessita visitar todas as cidades em seu *tour* apenas uma vez com a menor distância percorrida possível (ANGUS, 2007). A Figura 3.3 apresenta um mapa de cinco cidades (A,B,C,D,E) com suas respectivas distância entre si.

Figura 3.3 – Exemplificação de um problema TSP em que a trajetória de menor distância é dada por $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow A$.

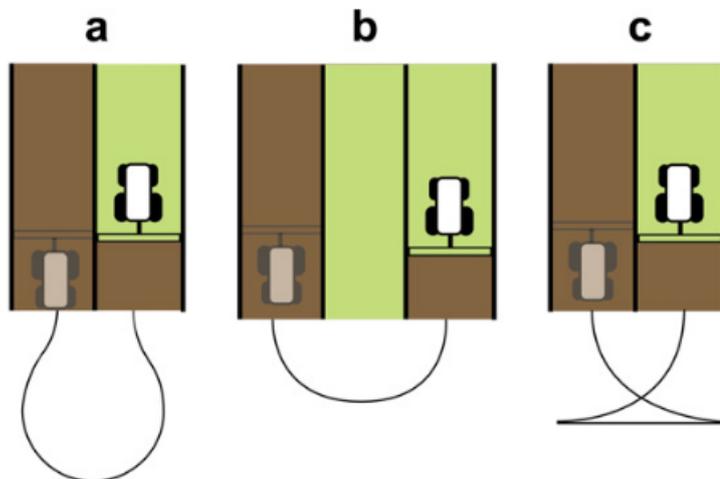


Fonte: (ANGUS, 2007)

Em seu estudo, Bochtis e Vougioukas (2008) tratam de três tipos de manobras retorno mais comumente utilizadas por máquinas agrícolas, sendo elas: *Gap-Turn* (Π – *Turn*), *Omega-Turn* (Ω – *Turn*) e *T-turn*, como ilustrado na Figura 3.4. As manobras Ω – *Turn* e *T-Turn* só serão executadas quando não for possível utilizar o Π – *Turn*.

A realização das manobras Ω – *Turn* e *T-Turn* é dado por diversos fatores como a habilidade e experiência do operador, quantidade de espaço disponível, entre outros. A execução da manobra Π – *Turn* é dada pela sua restrição $x > 2r_{min}$, em que x é a distância entre o ponto de saída até o próximo caminho a ser pulverizado e r_{min} é o raio de retorno mínimo em que o veículo é capaz de realizar.

Figura 3.4 – Manobras de retorno: (a) Ω – *Turn*, (b) Π – *Turn* e (c) *T-turn*.

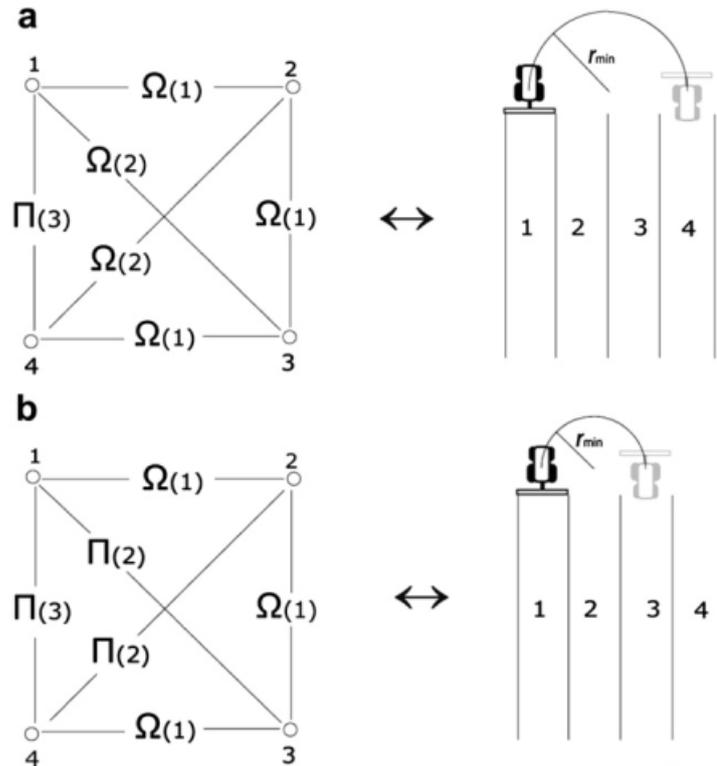


Fonte: (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008)

Unindo os conceitos de grafo apresentados pelo problema TSP e as manobras de retorno utilizadas comumente durante a pulverização agrícola, Bochtis e Vougioukas (2008) desenvol-

veram um algoritmo capaz de gerar a melhor trajetória para o operador da máquina agrícola executar. A Figura 3.5 mostra a interferência do raio de retorno mínimo (r_{min}) na geração da trajetória final, portanto a habilidade e experiência do operar é essencial para a melhor eficiência da pulverização.

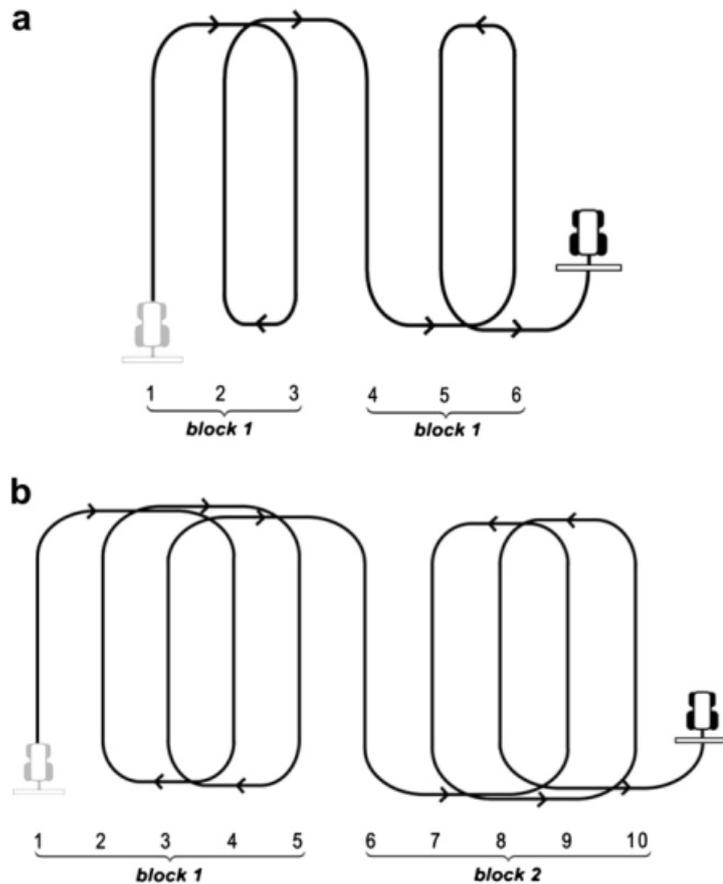
Figura 3.5 – Aplicação do problema TSP em uma pulverização agrícola



Fonte: (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008, Adaptado)

A Figura 3.6 ilustra o padrão de formação de blocos com três caminhos (a) e cinco caminhos (5). Bochtis e Vougioukas (2008) definem a quantidade de caminhos por bloco com o símbolo $bl(i)$, onde i é o número de caminhos por bloco. Então a pulverização adjacente mostrada pela Figura 3.2 seria representada por $bl(1)$.

Figura 3.6 – Blocos tradicionais de caminho adotados para a pulverização: (a) bl(3) com três caminhos por bloco e (b) bl(5) com cinco caminhos por bloco.



Fonte: (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008)

Inicialmente a quantidade de caminhos por blocos é definida pela "conveniência" do operador da máquina agrícola. Essa quantidade vai se alterando segundo a aplicação do algoritmo de otimização e o cenário em que se está ocorrendo a pulverização.

O operador da máquina agrícola foi pedido para pulverizar três regiões diferentes de duas formas: Pulverização com o auxílio de um navegador indicando a trajetória aferida pelo algoritmo implementado e sem o auxílio do navegador. A Figura 3.7 ilustra os três cenários tratados por Bochtis e Vougioukas (2008) e a Tabela 3.1 mostra os resultados obtidos.

Figura 3.7 – Localização dos campos de cultivos aplicados como cenários de teste.



Fonte: (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008)

Tabela 3.1 – Resultados obtidos das distâncias percorridas durante a execução das manobras de retorno.

Cenários	Dist. percorrida nas manobras de retorno [m]		Redução da dist. percorrida [%]
	Com navegador	Sem navegador	
1	258,54	565,40	54,27
2	181,57	210,20	13,62
3	176,57	242,21	27,10
Total	616,68	1017,81	39,41

Fonte: (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008)

Note que a redução da distância percorrida nas manobras de retorno foram reduzidas em até 54,27% após a aplicação do algoritmo de otimização. Devido a isso, os estudos realizados por Bochtis e Vougioukas (2008) serviram de motivação e justificativa para implementação de um algoritmo similar voltado para pulverização agrícola com a utilização de VANTs.

3.6 O uso de DGPS para a pulverização agrícola aérea

Ferramentas que auxiliam na navegação durante a pulverização agrícola são bastantes utilizadas. Uma dessas ferramentas aplicadas em pulverização agrícolas no Brasil é o guia de navegação *Skymap* fabricado pela empresa Travicar, vide a Figura 3.8.

Figura 3.8 – Ferramenta de navegação agrícola *Skymap*.

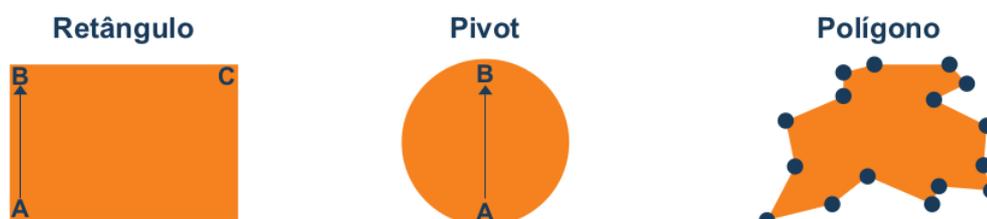


Fonte: (TRAVICAR, 2017)

A ferramenta de navegação agrícola *Skymap* utiliza a tecnologia DGPS (*Differential Global Positioning System*) para gerar suas trajetórias. Essa técnica de posicionamento é realizada por meio de um ou mais receptores que são fixados na região onde se deseja pulverizar, esses receptores são chamados de estações de referência. Essas estações possuem suas posição previamente conhecidas e servem como ponto de referência no momento da geração das trajetórias. As trajetórias geradas são enviadas para o piloto via um sistema de telecomunicação (AUERNHAMMER; MUHR; DEMMEL, 1995).

A Figura 3.9 ilustra o formato das áreas de pulverização suportadas pelo *Skymap*.

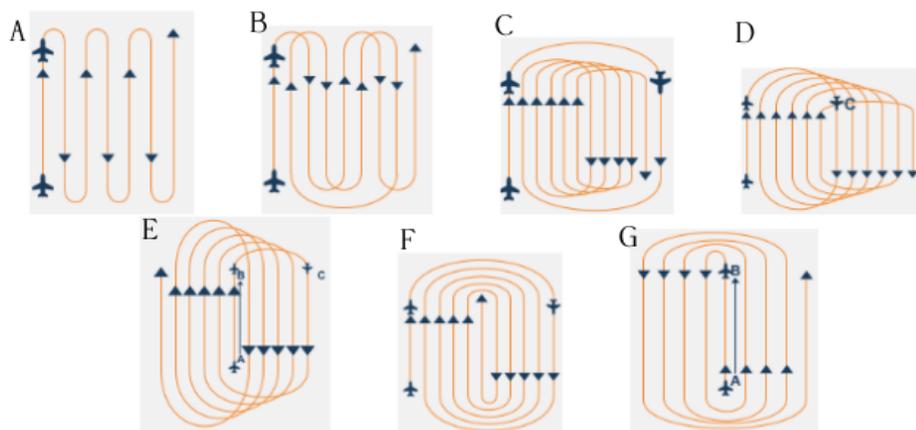
Figura 3.9 – Formato das áreas de pulverização suportados pelo *Skymap*.



Fonte: (TRAVICAR, 2017)

Como forma de pulverizar as áreas apresentadas na Figura 3.9, a ferramenta de navegação *Skymap* é capaz de gerar diversos tipos de trajetórias pré-definidas, que são representadas na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Trajetória geradas pelo *Skymap*: A - *Skip Back to Back* (SBK); B - *Skip Back to Back* (SBK); C - *Racetrack* (RCT); D - *Quick Racetrack* (QKR); E - *Reverse Racetrack* (RVR); F - *Squeeze* (SQZ); G - *Expand* (XPN).



Fonte: (TRAVICAR, 2017, Adaptado)

As trajetórias geradas pelo *Skymap* não são trajetórias otimizadas. Isso ocorre devido ao fato do *Skymap* ser pouco adaptável, não podendo executar nenhum outro tipo de trajetória daquelas que já estão pré-definidas. Outro fator que contribui para a falta de maleabilidade do *Skymap*, é a não definição da melhor velocidade de voo que deve ser executada pelo piloto, sendo que a velocidade de voo influencia de maneira direta a magnitude das manobras de voo.

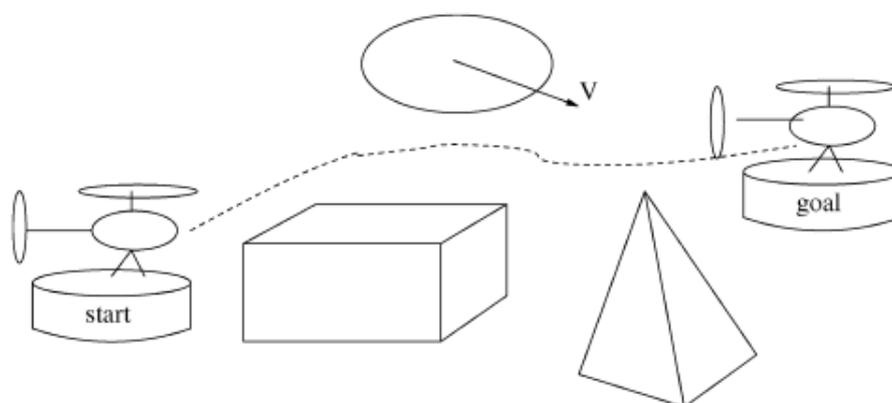
Tendo isso em mente, o presente trabalho procurou implementar um algoritmo não só capaz de gerar trajetórias para a pulverização, mas como também otimizá-las. A otimização se dá através da variação das trajetórias executadas e das velocidades de voo aplicadas durante o processo de pulverização.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Planejamento de uma trajetória

A trajetória planejada deve ser capaz de levar um determinado objeto de um ponto A ao ponto B, de maneira segura.

Figura 4.1 – Problema básico de planejamento de trajetória



Fonte: (YANG; ZHAO, 2004)

O plano de trajetória durante a pulverização é feito através da varredura de toda área que necessita ser pulverizada, portanto, haverá diversos pontos de partida e chegada, até que toda região tenha sido sobrevoada.

Afim de se gerar uma trajetória segura, primeiramente é necessário definir os conceitos de obstáculos, conflitos em potencial e ameaças. Yang e Zhao (2004) definem:

- **Obstáculo:** São estacionários ou se movem lentamente e podem ser evitados sobrevoando em volta deles.
- **Conflitos em potencial:** São objetos que se movem e não apresentam uma ameaça intencional.
- **Ameaças:** São objetos que podem ser estáticos ou se movem com a intenção de atingir a aeronave.

As ameaças podem ser divididas em duas categorias, previsíveis e imprevisíveis. Ameaças previsíveis são aquelas que podem ser detectadas a uma distância segura, enquanto as imprevisíveis, também chamadas de "*pop-up*", não são detectadas completamente.

O planejamento de uma trajetória pode ser feita em cinco tipos de cenários (YANG; ZHAO, 2004).

1. Ambientes que contém apenas obstáculos estáticos e conhecidos com antecedência.
2. Ambientes que podem conter objetos estáticos ou moveis, e suas localizações e propriedades são conhecidas previamente.
3. Ambientes que podem conter objetos estáticos ou moveis, porém não se conhecem exatamente suas localizações e propriedades.
4. Ambiente similar ao caso 3, com a adição de "*pop-up*".
5. Ambiente pode conter obstáculos, conflitos em potencial, ameaças previsíveis ou não e suas localizações e propriedades não são conhecidas.

Em um primeiro momento o presente trabalho tratou da pulverização para um ambiente do cenário 1, pois considerou-se que a área trabalhada fosse previamente conhecida e podendo ter ou não obstáculo estático.

4.2 Tipos de trajetória durante a pulverização

Durante a pulverização agrícola, a escolha da trajetória influencia de maneira direta a eficiência do processo. Para se determinar a melhor trajetória em uma área qualquer, três parâmetros são levados em consideração:

- Segurança;
- Tempo de voo da aeronave;
- Área total pulverizada.

A trajetória ótima será aquela que consiga sobrevoar toda a região de maneira segura, em um menor tempo e com a maior área pulverizada possível.

Existem diferentes métodos de cobrir uma área de forma eficiente, mas historicamente na aviação agrícola podemos relatar dois métodos de navegação (AKESSON; YATES, 1974):

- *Progressive Pass*;
- *Round Robin*.

4.2.1 *Progressive Pass*

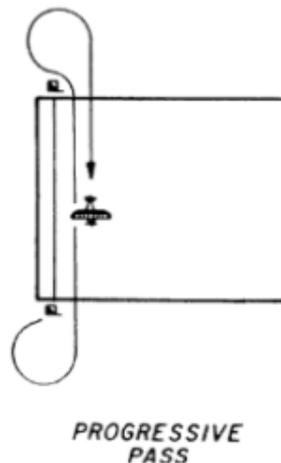
A Figura 4.2 ilustra a trajetória feita em *Progressive Pass*. O voo agrícola nessas condições é feito a baixa altitude, e o procedimento de curva para retornar a área a ser pulverizada é chamado de balão. Como representado na Figura 4.3, o voo realizado em *Progressive Pass* é feito seguindo os passos abaixo:

1. Pontos A-B: A aeronave realiza o processo de subida, afim de evitar possíveis obstáculos;
2. Pontos B-C: Inicia-se a execução da manobra de balão, o ângulo para sua realização depende do tamanho do raio em que será feito a manobra.
3. Pontos C-D: Execução completa do balão.
4. Pontos D-E: Redução de altitude para volta a área a ser pulverizada.

Os passos acima são realizados de maneira repetitiva, até que toda área seja sobrevoada.

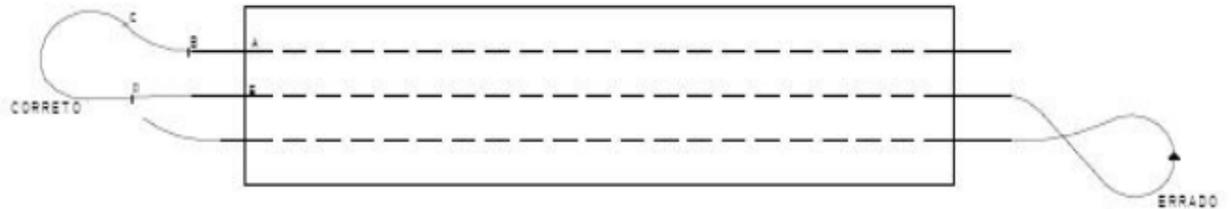
Vale ressaltar que o modelo aplicado neste trabalho, desconsidera os momentos de subida e descida da aeronave, focando a análise durante a manobra de balão.

Figura 4.2 – Trajetória em *Progressive Pass*



Fonte: B. (AKESSON; YATES, 1974)

Figura 4.3 – Passos para a trajetória em *Progressive Pass*



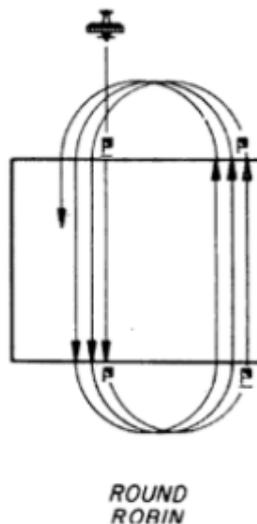
Fonte: (RASI, 2008)

O comportamento errado da aeronave durante a manobra de balão se dá na forma de se executar o retorno, como visto na Figura 4.3 a aeronave necessita realizar um maior arco, completando um círculo, dessa forma a distância percorrida se torna maior.

4.2.2 *Round Robin*

Para o voo realizado em *Round Robin*, Figura 4.4, a trajetória também é realizada em baixas altitudes, no entanto, os balões são feitos com arcos maiores e de maneira cíclica, até que toda área tenha sido pulverizada. O uso de arco maiores pode influenciar diretamente na eficiência da pulverização, pois dependendo do cenário em que o *Round Robin* é aplicado, pode acarretar em uma redução de distância percorrida.

Figura 4.4 – Trajetória em *Round Robin*



Fonte: B. (AKESSON; YATES, 1974)

4.3 Tipos de manobras de retorno

A manobra de balão é frequentemente utilizada tanto em *Progressive Pass*, quanto em *Round Robin*. Dessa forma, é de grande importância diferenciar os tipos balões e suas respectivas aplicações.

As manobras de retorno (balão), variam conforme a trajetória executada e o raio de curvatura da aeronave. O raio de curvatura é dado pela equação 4.1.

$$R = \frac{V^2}{a} \quad (4.1)$$

Onde:

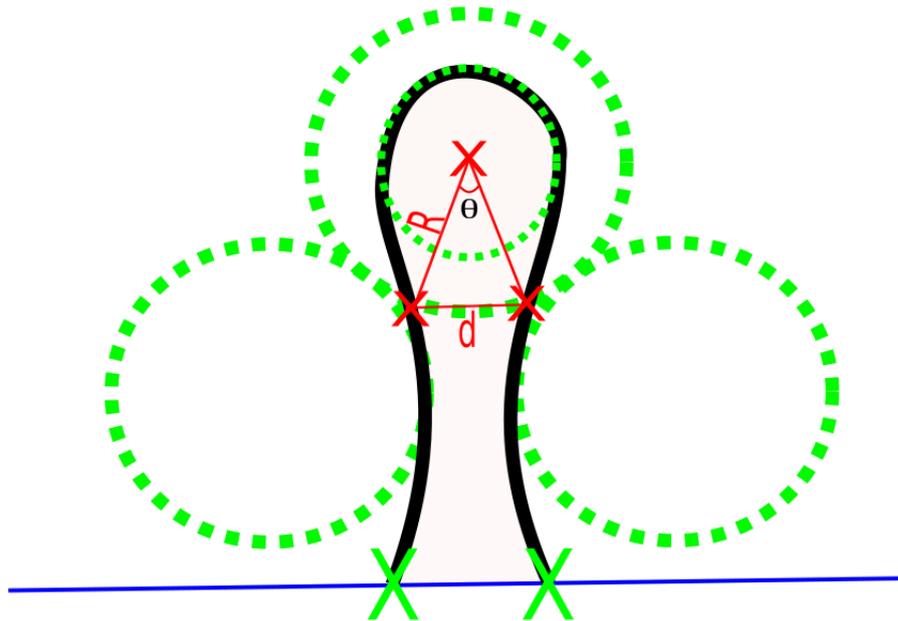
- V : Velocidade de voo da aeronave.
- a : Aceleração da aeronave.

Para o presente trabalho, foram utilizados 3 tipos de manobras:

1. *Omega-turn*.
2. *U-turn*.
3. *Gap-turn*.

4.3.1 *Omega-turn*

Este tipo de manobra é comumente utilizada em trajetórias *Progressive Pass*, onde a distância de retorno "d", é menor que duas vezes o raio de curvatura da aeronave.

Figura 4.5 – Manobra *Omega-turn*

Fonte: (SABELHAUS et al., 2013, Adaptado)

Como este trabalho visa aplicação desta manobra para uma pulverização agrícola, é necessário determinar a distância percorrida ao se executar este tipo de balão. A distância percorrida ao se executar a manobra *Omega-Turn* ($D_{Omega-Turn}$) é mostrada pela equação 4.2.

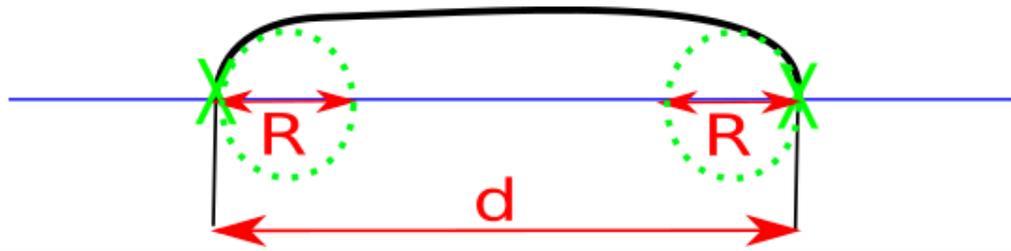
$$D_{Omega-Turn} = 2 \cdot \Pi \cdot R \cdot \left(\frac{360 - 2 \cdot \theta}{360} \right) \quad (4.2)$$

Onde o θ é dado pela equação 4.3.

$$\theta = \arcsin \left(\frac{d}{2 \cdot R} \right) \quad (4.3)$$

4.3.2 *U-turn*

A manobra *U-turn* normalmente é usado em trajetórias *Round Robin*, quando a distância de retorno "d" é maior que duas vezes o raio de curvatura da aeronave.

Figura 4.6 – Manobra *U-turn*

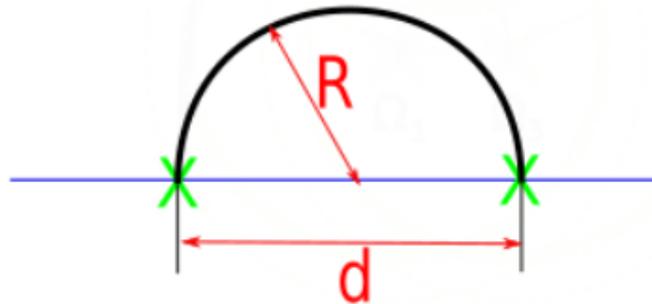
Fonte: (SABELHAUS et al., 2013, Adaptado)

Logo, a distância percorrida em uma manobra *U-turn* é dada pela equação 4.4.

$$D_{U-Turn} = d - 2 \cdot R + \pi \cdot R \quad (4.4)$$

4.3.3 *Gap-turn*

A manobra *Gap-turn* é usada em situações especiais, onde a distância de retorno é exatamente igual a duas vezes o raio de curvatura da aeronave.

Figura 4.7 – Manobra *Gap-turn*

Fonte: (SABELHAUS et al., 2013, Adaptado)

Nesta situação a distância percorrida é igual a metade do perímetro da circunferência, como descrito na equação 4.5.

$$D_{Gap-Turn} = \pi \cdot R \quad (4.5)$$

Para este trabalho, a manobra *Gap-turn* também foi aplicada para se evitar obstáculos.

5 METODOLOGIA

Para o presente estudo, foram considerados duas situações de estudo:

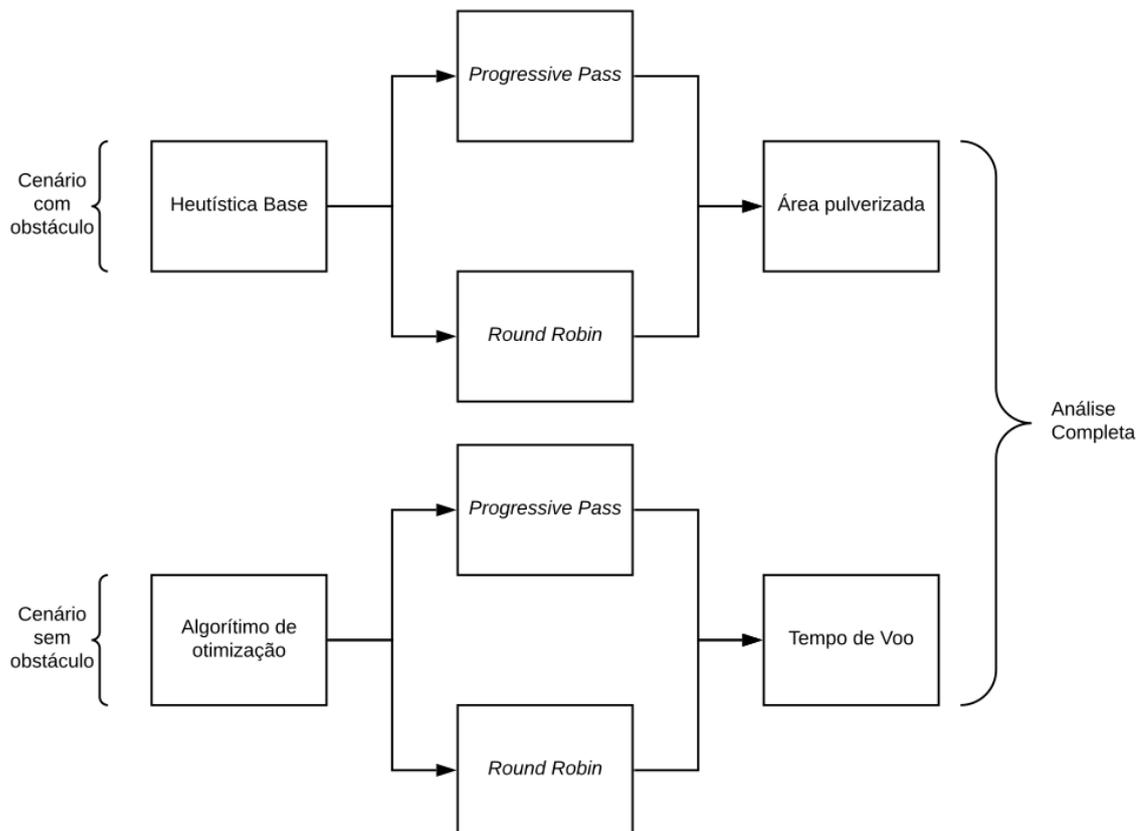
- Cenário com obstáculo;
- Cenário sem obstáculos.

Para um ambiente com obstáculos, o principal objeto de análise foi o comportamento do algoritmo desenvolvido, observando se o mesmo apresentava os critérios descritos na seção 3.1 e como a trajetória escolhida influenciaria na quantidade de área pulverizada.

Por fim, o uso de um ambiente sem obstáculos teve como objetivo um estudo aprofundado do tempo de voo da aeronave, tentando ao máximo otimizar a trajetória e eliminar os tempos improdutivos.

Dessa forma a metodologia do presente trabalho segue a estrutura apresentada pela Figura 5.1.

Figura 5.1 – Estrutura da metodologia seguida.



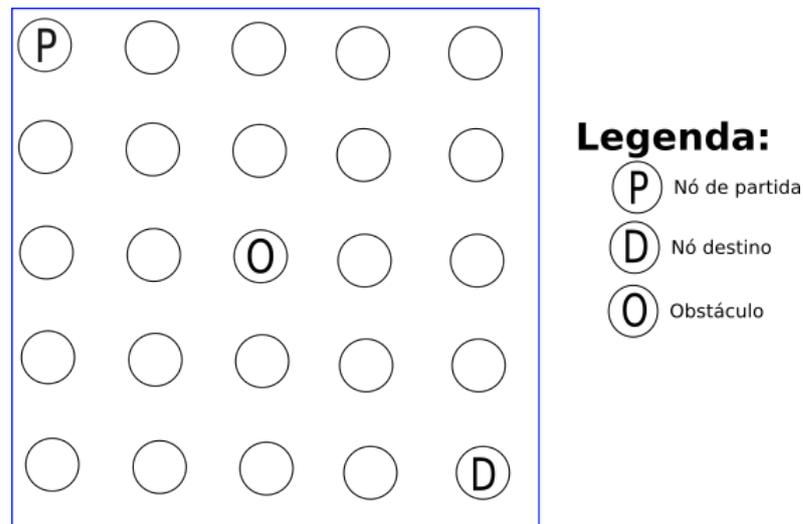
Fonte: Autor

Como forma de verificar se as trajetórias estavam sendo geradas conforme esperado após a sua otimização, também foi implementado um algoritmo com o auxílio do *software* MatLab[®]. Esse algoritmo utilizou dos dados coletados nos passos anteriores para criar uma animação gráfica que ilustra o comportamento do VANT durante a pulverização agrícola.

5.1 Cenário com obstáculo

Como já mencionado na seção 4.1, o cenário escolhido para a primeira parte do estudo foi de uma área conhecida, com a presença de apenas um obstáculo não móvel, fixado ao centro da região a ser pulverizada, como representado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Cenário com obstáculo.



Fonte: Autor

Para o estudo da área a ser pulverizada, foi levado em consideração os seguintes parâmetros:

- Área a ser pulverizada conhecida de 1000[m]X1000[m];
- Discretização em forma de grade, uniformemente distribuídos na região;
- Distância entre os nós fixa e igual a 10[m];
- Foi desconsiderado a geometria específica do obstáculo, sendo assim discretizado da mesma maneira que o restante da área, como forma de simplificação de cálculos;
- Aceleração máxima da aeronave de $2[m/s^2]$.

Vale ressaltar que como o intuito dessa análise é apenas ver o comportamento da aeronave devido a presença de um obstáculo e como isso interfere na quantidade de área pulverizada, o valor da aceleração não interfere na proporção final dos resultados, portanto adotou-se um valor aleatória para a mesma.

5.1.1 Heurísticas Adotadas

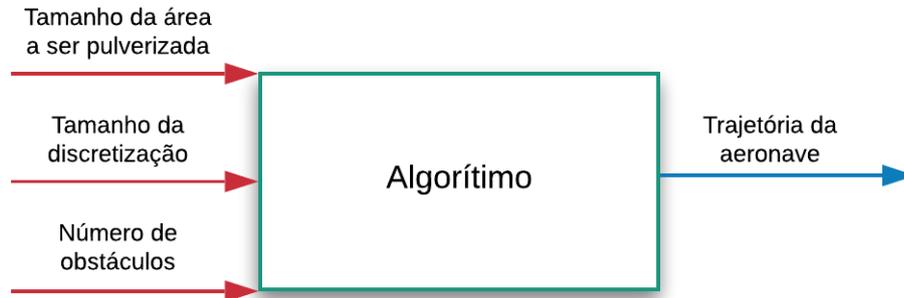
Basicamente existem duas abordagens para a solução do problema proposto: Algoritmos exatos e heurísticos. Algoritmos exatos são aqueles que sempre geram a solução exata do problema na ausência de erros ou arredondamentos. Por outro lado, algoritmos heurístico muitas vezes são mais rápidos e encontram soluções ótimos ou quase ótimos, devido a limitação de tempo de processamento ou armazenamento (GILLETT; MILLER, 1974).

Para o presente trabalho, a implementação de um algoritmos heurístico se torna mais viável devido as características específicas do problema apresentas a seguir:

- Tempo de processamento: Ao se trabalhar com VANTs, o tempo de processamento baixo é vital para se reduzir o risco de acidentes.
- Cenário de trabalho simplificado: O cenário de estudo é regular podendo ter ou não a presença de obstáculos fixos. Vide na Seção 4.1, onde são apresentados os cinco tipos de cenários possíveis de trabalho.

Tendo como base o conceito do algoritmo de busca A*, em um primeiro momento foi desenvolvido na linguagem C++ uma heurística base capaz de determinar o plano de trajetória em uma pulverização agrícola de uma área conhecida, não levando em consideração os parâmetros físicos da aeronave (velocidade de voo, aceleração, raio de curvatura) e qual forma de pulverização está sendo aplicada (*Progressive Pass* ou *Round Robin*). Os parâmetros de entrada e saída do algoritmo são apresentados na Figura 5.3.

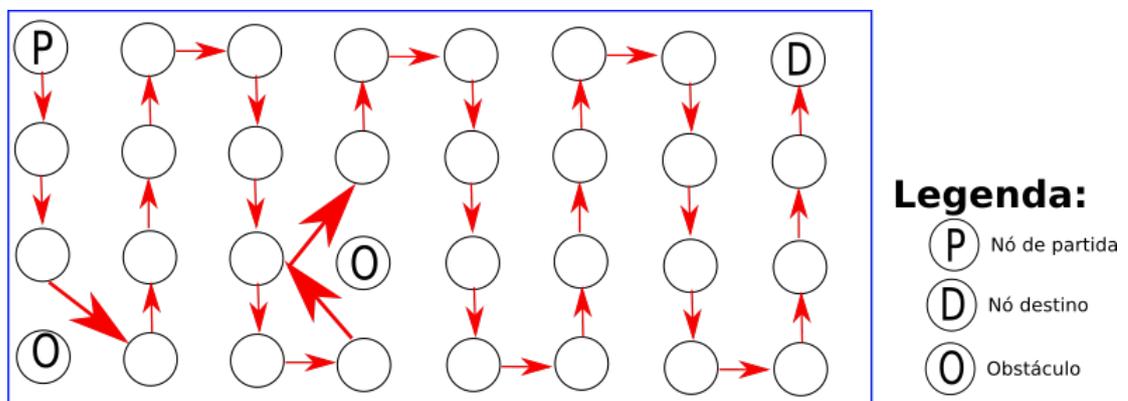
Figura 5.3 – Representação em caixa preta da heurística base.



Fonte: Autor

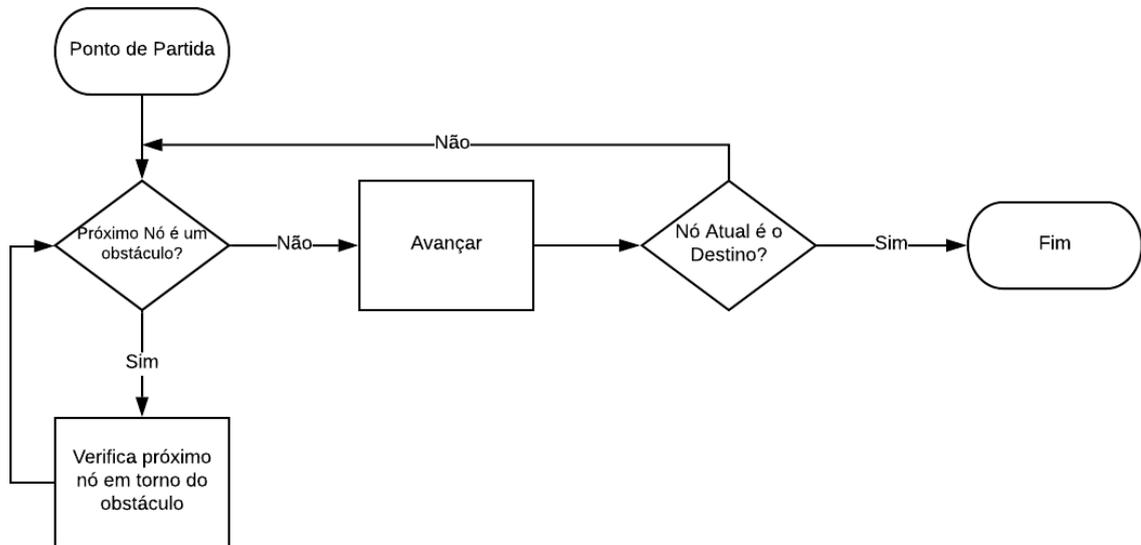
A partir dos dados de entrada, o algoritmo irá dividir a área a ser pulverizada em pequenas áreas discretizadas, onde os obstáculos serão espalhados de maneira aleatória pela região. As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam respectivamente a ilustração do funcionamento da heurística e seu fluxograma.

Figura 5.4 – Ilustração do funcionamento da heurística base.



Fonte: Autor

Figura 5.5 – Fluxograma do funcionamento da heurística base.



Fonte: Autor

A partir de seu nó de partida, a heurística base verifica se a próxima área a ser pulverizada apresenta um obstáculo. Caso positivo, é traçado um plano de trajetória para ela, caso negativo é verificado se alguma região próxima a ela, está livre de obstáculos. Este processo se repete até que toda área possível tenha sido pulverizada.

Note que diferentemente do algoritmo A*, a heurística base não necessita de uma região de reconhecimento. Isto ocorre pois a heurística base é aplicada em uma situação de área e obstáculo conhecidos, logo não há necessidade de se fazer o reconhecimento em cada nó. Já o algoritmo A* recebe como parâmetros apenas o nó de partida e destino, não tendo informações algum sobre a área ou a presença de possíveis obstáculos. Logo há necessidade de uma região de reconhecimento. A Tabela 5.1 apresenta a comparação entre a heurística base e o algoritmo A*.

Tabela 5.1 – Comparativo A* VS Heurística Base.

	A*	Heurística Base
Região de reconhecimento	Presente	Não presente
Nós Vizinhos	Presente	Não presente
Tratamento de áreas desconhecidas	Presente	Não presente
Trata obstáculos móveis	Presente	Não presente
Tempo de resposta	Elevado	Reduzido

Fonte: Autor

Como mostrado na Tabela 5.1, a heurística base é menos robusta quando comparada ao algoritmo A*. No entanto, para um cenário com área conhecida e obstáculos fixos, seu uso se torna recomendável, pois o tempo de geração da trajetória é menor devido a não necessidade da região de reconhecimento.

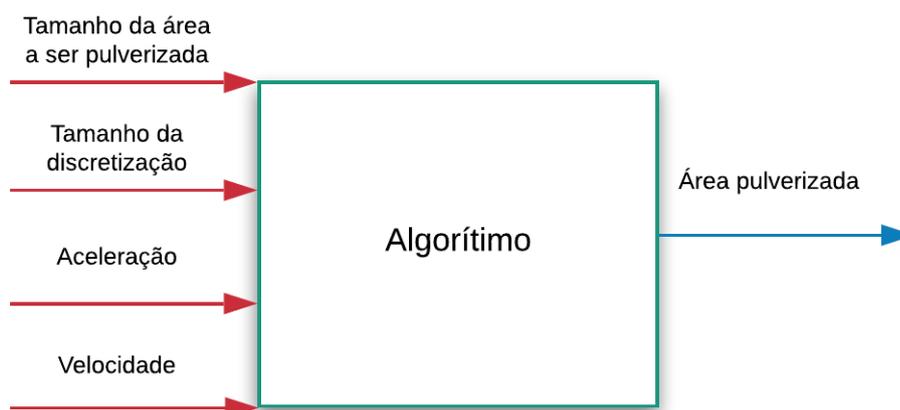
Como o objetivo desta primeira parte é analisar a quantidade de área pulverizada em um cenário com obstáculo, fez-se necessário comparar o comportamento da heurística em pelo menos dois tipos diferentes de trajetórias.

5.1.2 Heurística *Progressive Pass*

Através da heurística base, foi possível gerar um plano de trajetória que não considera-se os parâmetros físicos da aeronave, dessa forma, em momentos no qual a aeronave necessita-se realizar alguma manobra devido a um obstáculo ou para retornar a área a ser pulverizada, as distâncias percorridas durante as manobras não eram contabilizadas.

Através da heurística base desenvolvida, foi implementada uma segunda heurística, no qual seus parâmetros de entrada e saída são apresentadas na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Representação em caixa preta da heurística levando em consideração fatores físicos da aeronave.



Fonte: Autor

Em relação a heurística base, o algoritmo para o *progressive pass* necessita como valor de entrada alguns parâmetros da aeronave (velocidade e aceleração), e não há mais a necessidade de se informar a quantidade de obstáculos, devido as características do cenário em estudo apresentado na seção 5.1. Seu valor de saída é a área pulverizada, pois a finalidade desta pri-

$$D_{manobras-pp} = D_{Omega-Turn} \cdot N_{Omega-Turn} + D_{Gap-Turn} \quad (5.1)$$

onde $N_{Omega-Turn}$ é o número de manobras realizadas do tipo *Omega-turn*.

Logo a distância total percorrida para o *progressive pass* é dada pela equação 5.2,

$$D_{percorrida} = D_{manobras-pp} + D_{pulverizada} \quad (5.2)$$

onde a distância percorrida durante a pulverização ($D_{pulverizada}$), é dada pela simples adição das distâncias entre as áreas pulverizadas.

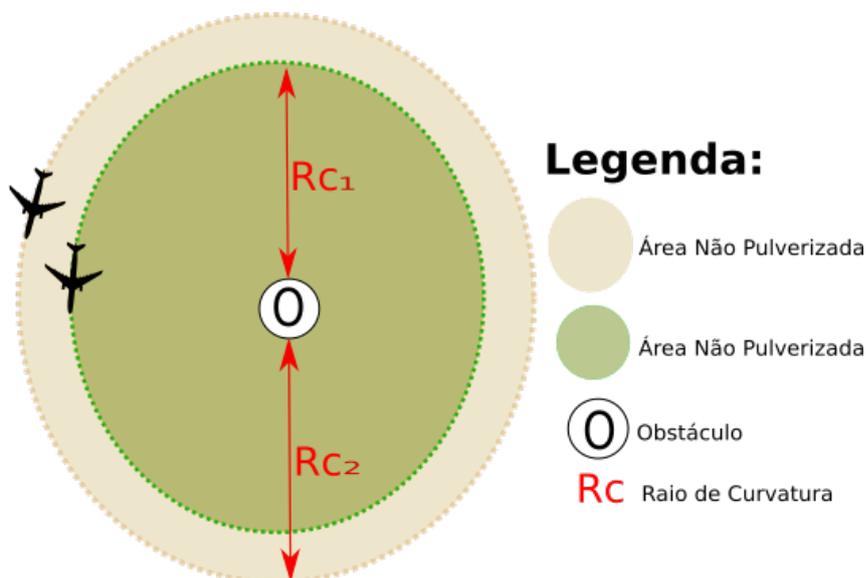
Com valor da distância percorrida obtido, é possível calcular o tempo de voo considerando que a aeronave se move a uma velocidade constante, como visto na equação 5.3.

$$t_{voo} = \frac{V}{D_{percorrida}} \quad (5.3)$$

Para se calcular a área pulverizada, utiliza-se a equação 4.1, no qual é determinado o raio de curvatura da aeronave.

A quantidade de área pulverizada está diretamente relacionado com a presença de obstáculos, pois para que a aeronave consiga realizar a manobra de maneira segura e que respeite os limites físicos da mesma, a manobra deve começar a ser realizada a uma distância do obstáculo igual ou maior que seu raio de curvatura. Assim quanto maior for o raio de curvatura da aeronave, maior será a manobra realizada e conseqüentemente menor será a área pulverizada. A Figura 5.8 ilustra a influência do raio de curvatura da aeronave (R_c) na quantidade de área pulverizada.

Figura 5.8 – Influência do raio de curvatura na quantidade de área não pulverizada.



Fonte: Autor

Desta forma, a área pulverizada é dada pela equação 5.4.

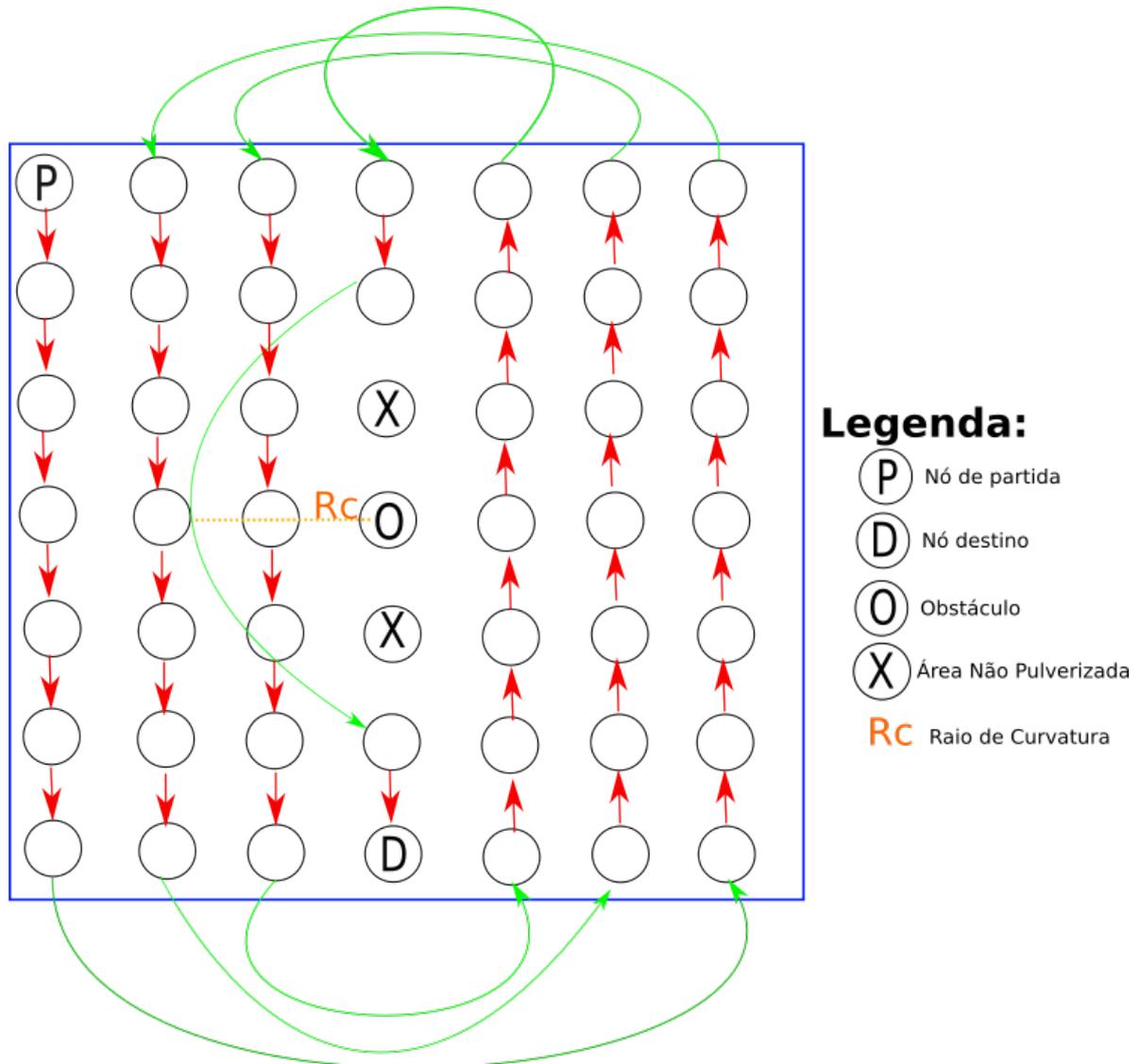
$$A_{pulverizada} = A_{total} - A_{Obst} - A_{NaoPulverizada} \quad (5.4)$$

Onde:

- A_{total} : Área total a ser pulverizada.
- A_{Obst} : Área do obstáculo.
- $A_{NaoPulverizada}$: Área não pulverizada.

5.1.3 Heurística *Round Robin*

De maneira análoga a heurística *progressive pass*, foi implementada um rotina levando em consideração a trajetória do tipo *round robin*. A Figura 5.9 ilustra o comportamento da aeronave para este tipo de trajetória.

Figura 5.9 – Ilustração da heurística *Round Robin*.

Fonte: Autor

Em uma trajetória *round robin*, foram usados todos os 3 tipos de manobras: *Omega-turn*, *U-turn* e *Gap-turn*. Os critérios de uso para cada manobra foram apresentados na seção 4.3.

A área pulverizada para o *round robin* se mantém o mesmo do *progressive pass*, isso ocorre pois para se evitar os obstáculos em ambos os casos usou-se a manobra *Gap-turn*.

O tempo de voo se altera em relação ao *progressive pass*, pois as distâncias percorridas não são as mesmas devido a aplicação das diferentes manobras. Logo, a distância percorrida durante as manobras em *round robin* é dada através das equações 4.2, 4.4 e 4.5.

$$D_{manobras-rr} = D_{Omega-Turn} \cdot N_{Omega-Turn} + D_{Gap-Turn} \cdot N_{Gap-Turn} + D_{U-Turn} \cdot N_{U-Turn} \quad (5.5)$$

Onde $N_{\Omega\text{-Turn}}$, $N_{\text{Gap-Turn}}$ e $N_{U\text{-Turn}}$ são número de manobras em *Omega-turn*, *Gap-turn* e *U-turn*, respectivamente.

Dessa forma, a distância total percorrida para o *round robin* é dada pela equação 5.6.

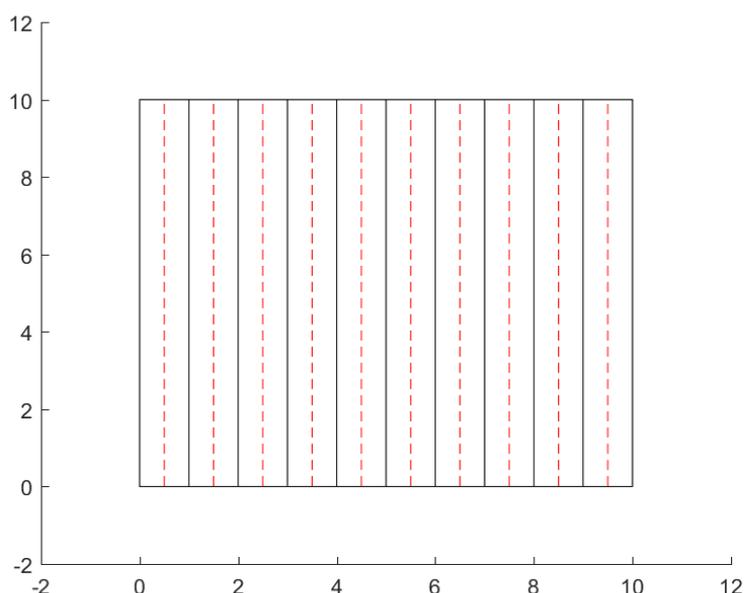
$$D_{\text{percorrida}} = D_{\text{manobras-rr}} + D_{\text{pulverizada}} \quad (5.6)$$

Para se obter o tempo de voo da aeronave, novamente foi aplicado a equação 5.3.

5.2 Cenário sem obstáculo

Novamente, adota-se uma área conhecida regular como apresentada na Figura 5.10.

Figura 5.10 – Cenário sem obstáculo.



Fonte: Autor

Como o objeto de estudo deste cenário é focado na otimização da trajetória com a redução dos tempos improdutivos afim de se aproximar ou chegar a um ponto ótimo, os parâmetros levados em consideração para análise foram alterados em relação ao cenário com obstáculo.

- Área a ser pulverizada conhecida de 1000[m]X1000[m].
- Discretização simplificada, devido a ausência de obstáculos.
- Adota-se um VANT de asa fixa de envergadura igual a 10[m].

- Aceleração máxima da aeronave igual a $3g[m/s^2]$, ou seja, 3 vezes a aceleração da gravidade.
- Velocidade de voo variando de 1 a $150[m/s]$.

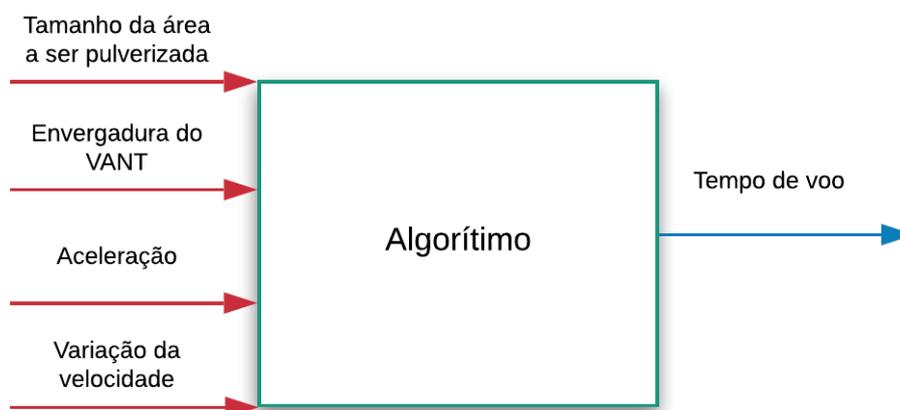
Note que o valor da aceleração para este cenário interfere diretamente o resultado final, visto que o objeto de estudo agora é o tempo de voo da aeronave. Isso ocorre pois a aceleração da aeronave determina o raio de curvatura, equação 4.1. O raio de curvatura afeta diretamente a distância percorrida, que por sua vez altera o tempo de voo, note a equação 5.3.

Outra diferenciação importante para este tipo de cenário foi a forma de discretização adotada. Como não existe obstáculos, não há necessidade de uma discretização aprofundada dentro da área a ser pulverizada. Assim para discretização da região trabalhada, foi adotado a envergadura da aeronave como parâmetro para a divisão da área, por exemplo, para o caso de uma área igual a $1000[m] \times 1000[m]$ e uma aeronave de envergadura igual a $10[m]$, a região é dividida em 100 faixas iguais, como ilustrado na Figura 5.10, onde os tracejados em vermelhos representam a movimentação da aeronave pela região.

5.2.1 Funcionamento geral da heurística de otimização

A elaboração da heurística de otimização foi feita com o auxílio do *software* MatLab[®], onde seus parâmetros de entrada e saída são ilustrados na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Representação em caixa preta da heurística de otimização.



Fonte: Autor

A implementação deste algoritmo tem como objetivo reduzir os tempos improdutivos durante a pulverização, essa otimização se teve a partir da geração de diversos tipos de trajetórias levando em consideração os parâmetros apresentados na seção 5.2.

O funcionamento da heurística de otimização é similar as heurísticas de *Progressive Pass* e *Round Robin* implementadas na linguagem C++, cujas suas características básicas podem ser comparadas através da Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Comparativo das Heurísticas Implementadas.

Parâmetros	Heurísticas			
	Base (C++)	Progressive Pass (C++)	Round Robin (C++)	Otimização (MatLab®)
Trata obstáculos	X	X	X	
Quantifica a área pulverizada		X	X	
Determina a melhor velocidade de voo		X	X	X
Considera a física da aeronave		X	X	X
Simplificação da discretização				X
Ampla gama de velocidade de voo				X
Gera diversas variações de trajetória				X
Reduz o tempo de voo				X
Gera gráficos, tabelas e animações gráficas				X

Fonte: Autor

Note que a heurística de otimização tem como objetivo principal reduzir o tempo de voo durante a pulverização através da otimização da trajetória. Essa otimização se dá pela variação da forma em que a aeronave percorre a área a ser pulverizada.

Apesar das diferenças presentes entre o cenário com e sem obstáculos, a forma de cálculo da distância percorrida e tempo de voo permanecem as mesma, vide que o algoritmo de otimização apenas realiza a variação de trajetórias já tratadas anteriormente.

O algoritmo de otimização é capaz de gerar a trajetória *Progressive Pass* básica e diversos outros tipos de trajetória em *Round Robin*, como será melhor exemplificada nas seções seguintes.

Para cada trajetória obtida, o algoritmo simula o comportamento da aeronave a uma velocidade de voo constante determinada, essa velocidade de voo tem seu valor mínimo igual 1[m/s] que em cada passo da simulação sofre um acréscimo de 1[m/s], esse valor pode ser facilmente alterado dependendo o grau de suavização das curvas em que se deseja obter, até a aeronave alcançar a velocidade máximo de 150[m/s]. Portanto, para cada trajetória gerada, é si-

mulado 150 vezes o comportamento do VANT para aquela trajetória, uma para cada velocidade de voo.

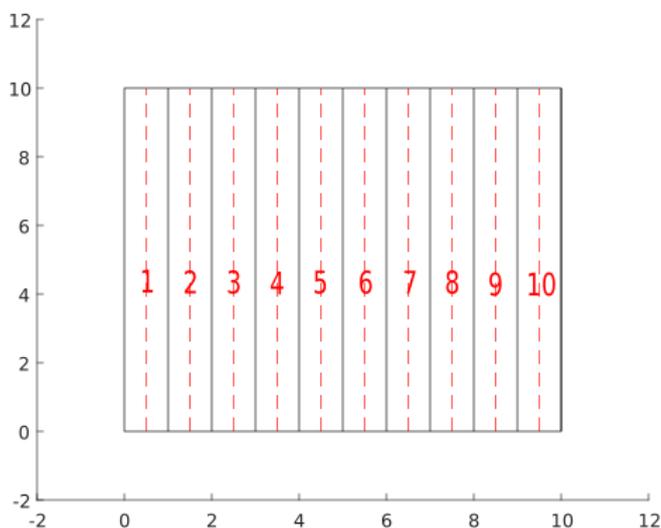
Após todas as simulações para uma determinada trajetória tenham sido realizadas, o algoritmo seleciona em qual velocidade de voo em que a aeronave obteve o menor tempo de voo, assim determinando o melhor caso para aquela determinada trajetória.

5.2.2 Otimização das trajetórias

A otimização da trajetória se dá através da variação da trajetória em *Round Robin*. Não se variou-se a trajetória em *Progressive Pass* devido a sua característica se ter passos de retornos de tamanho fixo, ou seja, mesmo que se altera-se o tamanho dos passos de retorno, não haveria alterações drásticas no comportamento geral da aeronave devido essa característica sequencial deste tipo de trajetória.

Inicialmente discretiza-se a área a ser pulverizada, como mostrada na Figura 5.12.

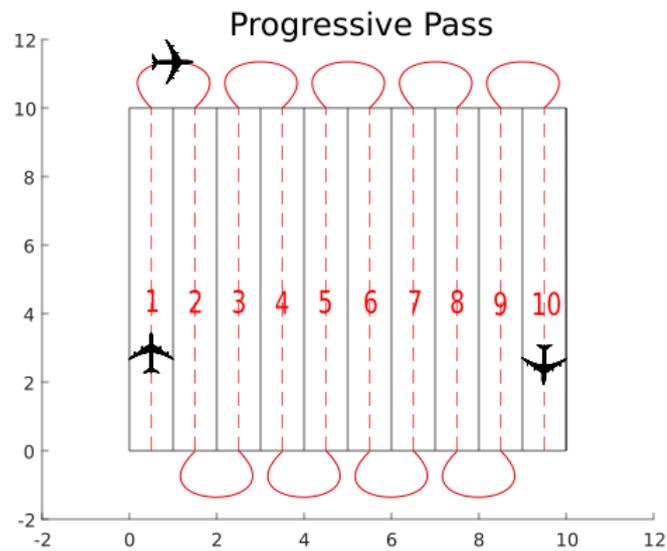
Figura 5.12 – Discretização simplificada a área de trabalho.



Fonte: Autor

Após a discretização simplificada, o algoritmo gera um vetor indicando a ordem em que cada região deve ser pulverizada. Esse vetor é chamado vetor caminho e sua sua composição seria a seguinte para o caso *Progressive Pass* : [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]. A trajetória executada pelo vetor caminho no caso do *Progressive Pass* é ilustrada na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Trajetória em *Progressive Pass* pelo algoritmo de otimização.

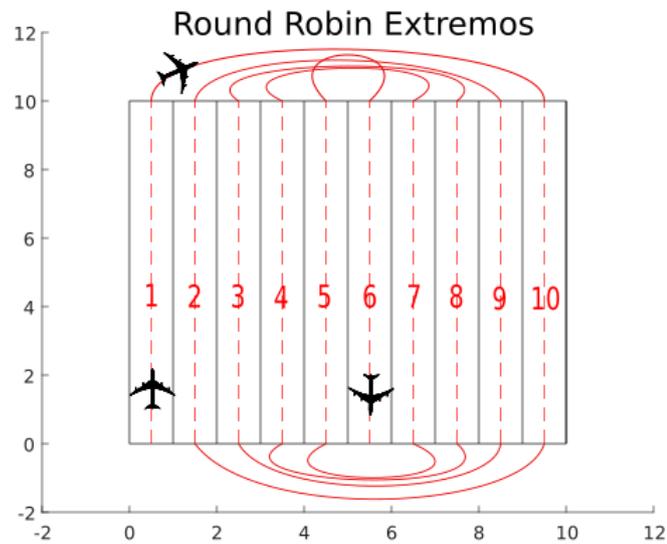


Fonte: Autor

Através dos critérios estabelecidos na seção 4.3, a escolha do tipo de manobra de retorno dependem da distância de retorno e do raio de curvatura da aeronave, no entanto, as trajetórias em *Progressive Pass* tendem a utilizar com maior frequência a manobra *Omega-turn*, pois o raio de curvatura é maior do que o espaçamento entre duas regiões consecutivas de pulverização.

O tratamento da trajetória em *Round Robin* é feito de maneira similar. O vetor caminho será gerado segundo as características estabelecidas desse tipo de trajetória. Entretanto, o algoritmo de otimização irá gerar diversos vetores caminhos, um para cada variação da trajetória em *Round Robin*, essa variação se dá a partir da trajetória básica do *Round Robin*, aqui denominada *Round Robin Extremos*, conforme ilustrado na Figura 5.14.

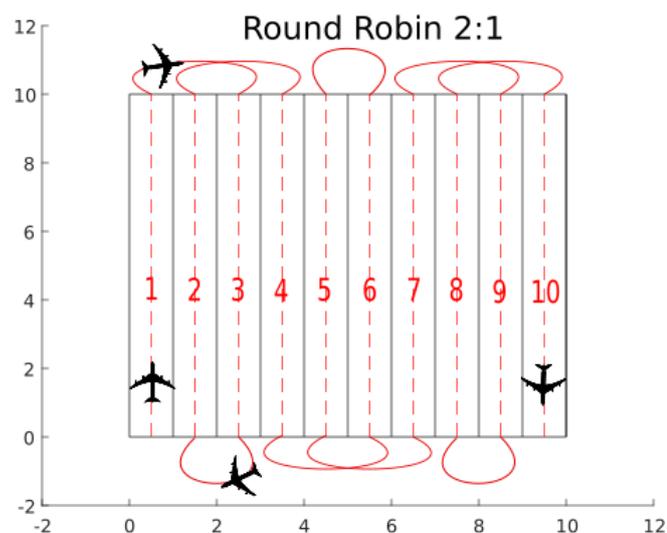
Figura 5.14 – Trajetória em *Round Robin* Extremos pelo algoritmo de otimização.



Fonte: Autor

A partir da variação desse tipo de trajetória, onde as distâncias de retorno variam a cada passo da pulverização, gerou-se outros tipos de trajetórias *Round Robin*, no qual definiu-se uma distância de avanço e uma de retorno, por exemplo, um *Round Robin* em que a cada dois passos de avanço, existe um de retorno é denominado *Round Robin* 2:1, como representado na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Trajetória em *Round Robin* 2:1 pelo algoritmo de otimização.



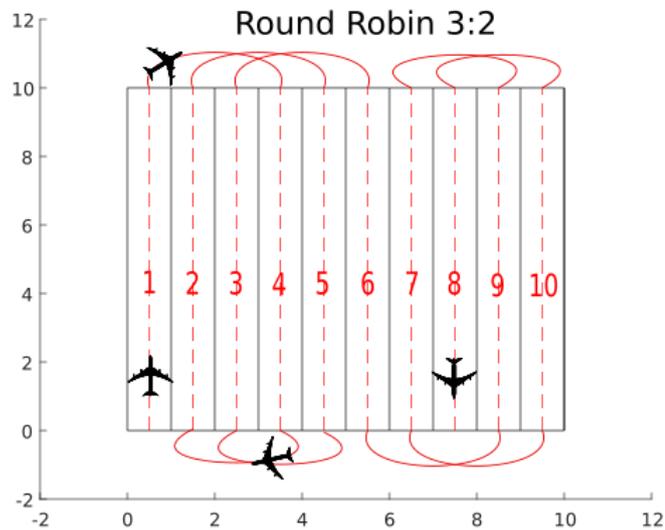
Fonte: Autor

Note que o algoritmo reconhece as áreas que já foram pulverizadas, e devido a isto, o mesmo é capaz de evitar a sobreposição da região através do reinício do processo de criação

do vetor caminho. Por exemplo, nesse caso do *Round Robin 2:1* o vetor caminho deveria ser [1,3,2,4,3,5,4,6,5,7,6,8,9,10], perceba que em diversas situações haveria casos de sobreposição. Como forma de evitar esse problema, o algoritmo ao perceber que a área já está pulverizada, reinicia o processo até completar toda a área a ser pulverizada, gerando o vetor caminho [1,3,2,4,6,5,7,9,8,10].

O mesmo processo se repete para as demais variações da trajetória *Round Robin*, vide a Figura 5.16.

Figura 5.16 – Trajetória em *Round Robin 3:2* pelo algoritmo de otimização.



Fonte: Autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como mostrado no Capítulo 5, a metodologia do presente trabalho foi dividida em três partes:

- Cenário com obstáculo;
- Cenário sem obstáculo;
- Animação gráfica.

Portanto, a coleta de dados foi realizada seguindo a mesma estrutura.

6.1 Cenário com obstáculo

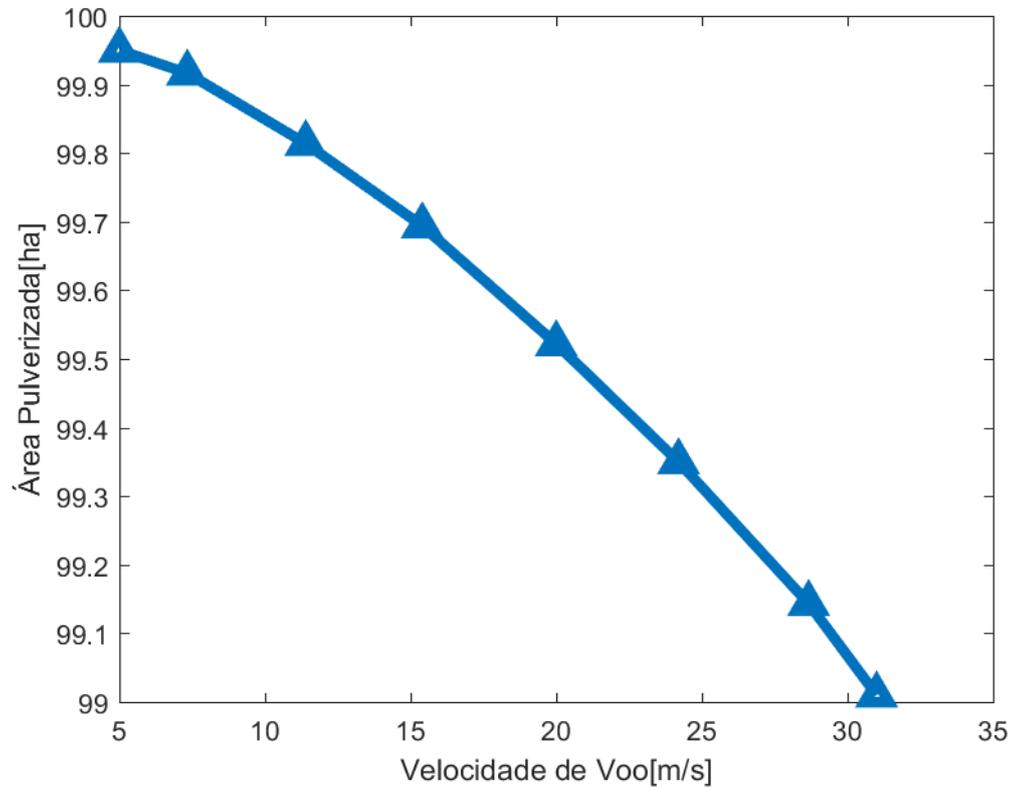
Para o cenário proposto na seção 5.1, foram realizadas diversas simulações, no qual variou-se a velocidade de voo da aeronave. Dessa forma foi possível verificar influência da mesma na quantidade de área pulverizada.

6.1.1 *Progressive Pass*

Tabela 6.1 – Resultados obtidos para *progressive pass*.

Voo em <i>Progressive Pass</i>				
Aceleração Máxima= $2[m/s^2]$; Área total=100[ha]				
Vel. de Voo[m/s]	R[m]	Área Pulverizada [ha]	Tempo de Voo [h]	Dist. Percorrida [m]
5	12,5	99,95	5,93	106742
7	24,5	99,93	4,53	114242
10	50	99,87	3,61	130121
15	112,5	99,75	3,13	169056
20	200	99,57	3,10	223552
25	312,5	99,35	3,27	293629
30	450	99,07	3,51	379267
31	480,5	99,01	3,57	398265

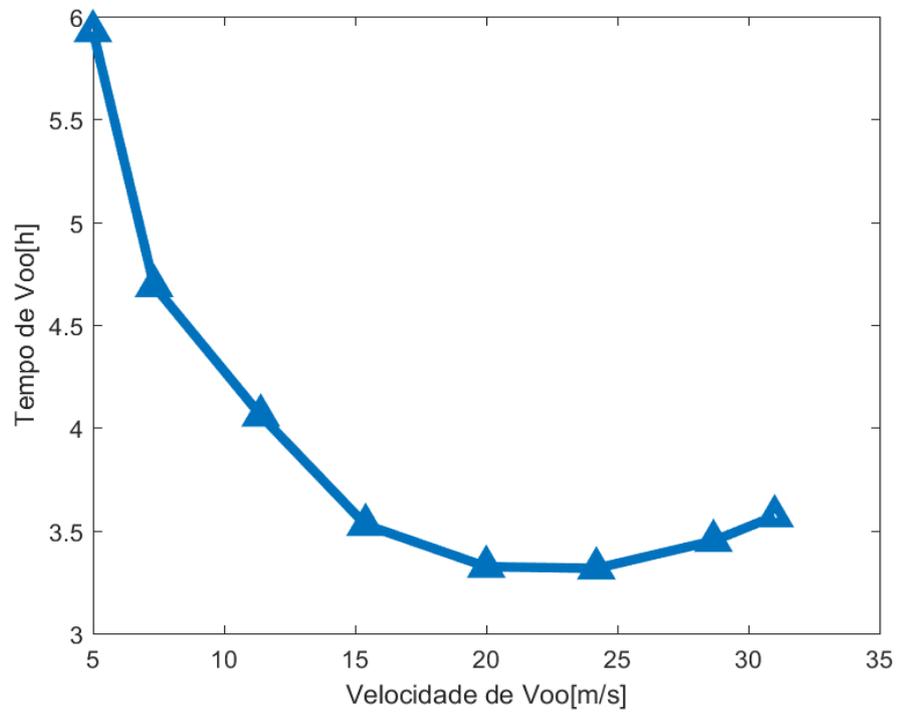
Fonte: Autor

Figura 6.1 – Área Pulverizada X Velocidade de Voo - *Progressive Pass*.

Fonte: Autor

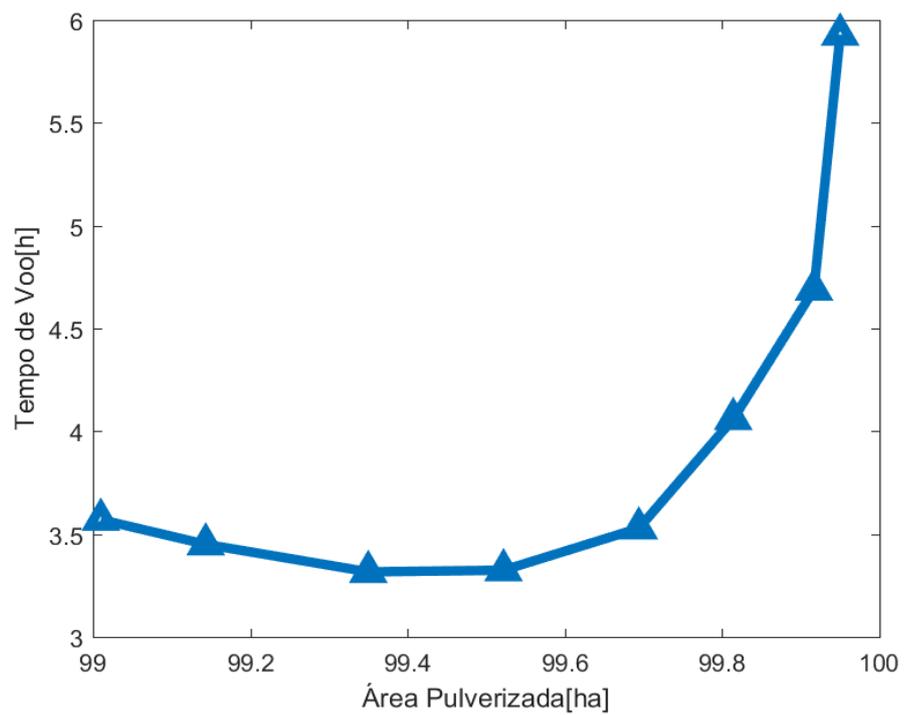
A Figura 6.1 demonstra o comportamento da área pulverizada em relação a velocidade de voo da aeronave. Como esperado, quanto maior for a velocidade de voo, menor será a área pulverizada. Isso ocorre pois a velocidade de voo influencia diretamente o raio de curvatura, vide equação 4.1, assim quanto maior for o raio de curvatura, maior será a manobra que a aeronave realiza para se evitar o obstáculo.

Figura 6.2 – Tempo de Voo X Velocidade de Voo - *Progressive Pass*.

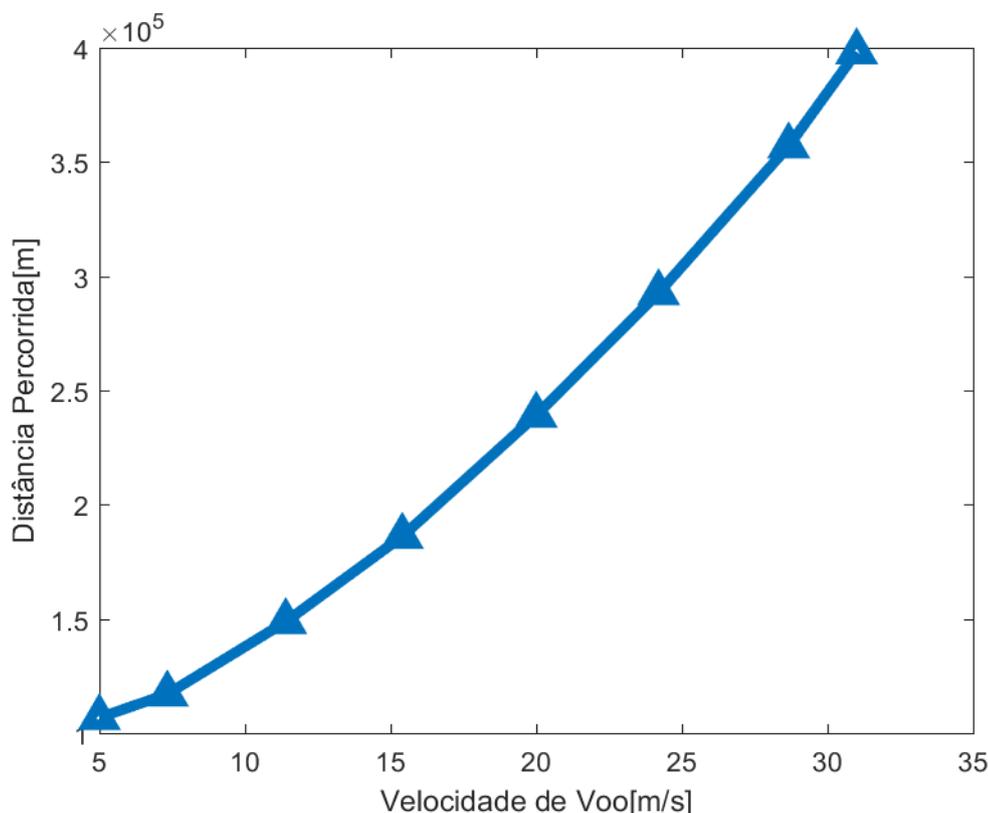


Fonte: Autor

Figura 6.3 – Tempo de Voo X Área Pulverizada - *Progressive Pass*.



Fonte: Autor

Figura 6.4 – Distância Percorrida X Velocidade de Voo - *Progressive Pass*.

Fonte: Autor

Os resultados apresentados pela Figura 6.2 mostram o comportamento do tempo de voo ao se variar a velocidade de voo. Neste caso, o tempo de voo diminui até a velocidade de voo de 20[m/s], porém para velocidades mais altas, o tempo de voo aumenta. A explicação para esse comportamento é dada pelas equações 4.1 e 5.3. Note que o tempo de voo é dado pela relação entre a velocidade e distância percorrida, enquanto a distância percorrida está diretamente ligada ao raio de curvatura da aeronave. O raio de curvatura é encontrado por uma função quadrática da velocidade de voo, assim para um pequeno incremento da velocidade, tem-se um ganho quadrático em seu raio de curvatura. Note a Figura 6.4, para uma velocidade de 30[m/s] teve-se uma distância percorrida de 321022[m] e para uma velocidade de 31[m/s] obteve-se uma distância de 341022. Portanto, pode-se observar que para uma pequena variação de velocidade (1[m/s]) teve-se um grande aumento da distância percorrida (20451[m]), causando assim o aumento de tempo de voo.

É importante ressaltar que o presente trabalho não analisou o comportamento da aeronave para velocidades maiores que 31[m/s], pois o objetivo é encontrar a trajetória com melhor eficiência. Observe novamente a Tabela 6.1, a partir da velocidade de 25[m/s], começa-se a ter

uma queda da área pulverizada e um aumento do tempo de voo, logo, para velocidade maiores que 25[m/s] a pulverização não seria mais eficiente.

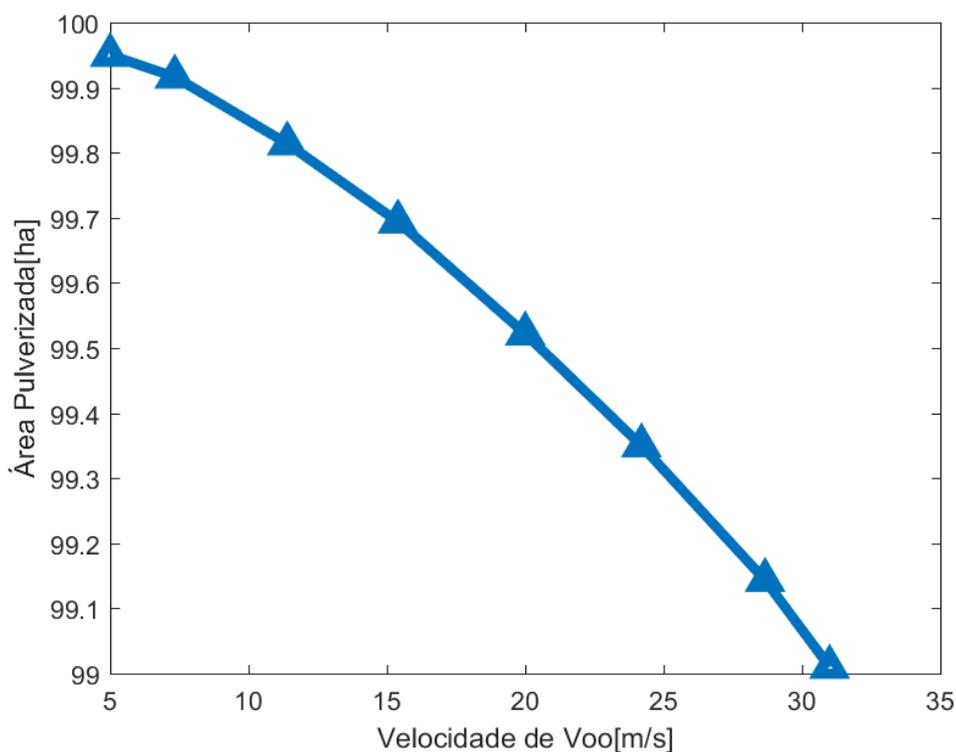
6.1.2 Round Robin

Tabela 6.2 – Resultados obtidos para *round robin*.

<i>Round Robin</i>				
Aceleração Máxima= $2[m/s^2]$; Área total=100[ha]				
Vel. de Voo[m/s]	R[m]	Área Pulverizada[ha]	Tempo de Voo [h]	Dist. Percorrida [m]
5	12,5	99,95	8,39	150965
7	24,5	99,93	6,05	152566
10	50	99,87	4,35	156532
15	112,5	99,75	3,14	16907
20	200	99,57	2,72	195726
25	312,5	99,35	2,70	242868
30	450	99,07	2,97	321022
31	480,5	99,01	3,06	341473

Fonte: Autor

Figura 6.5 – Área Pulverizada X Velocidade de Voo - *Round Robin*.

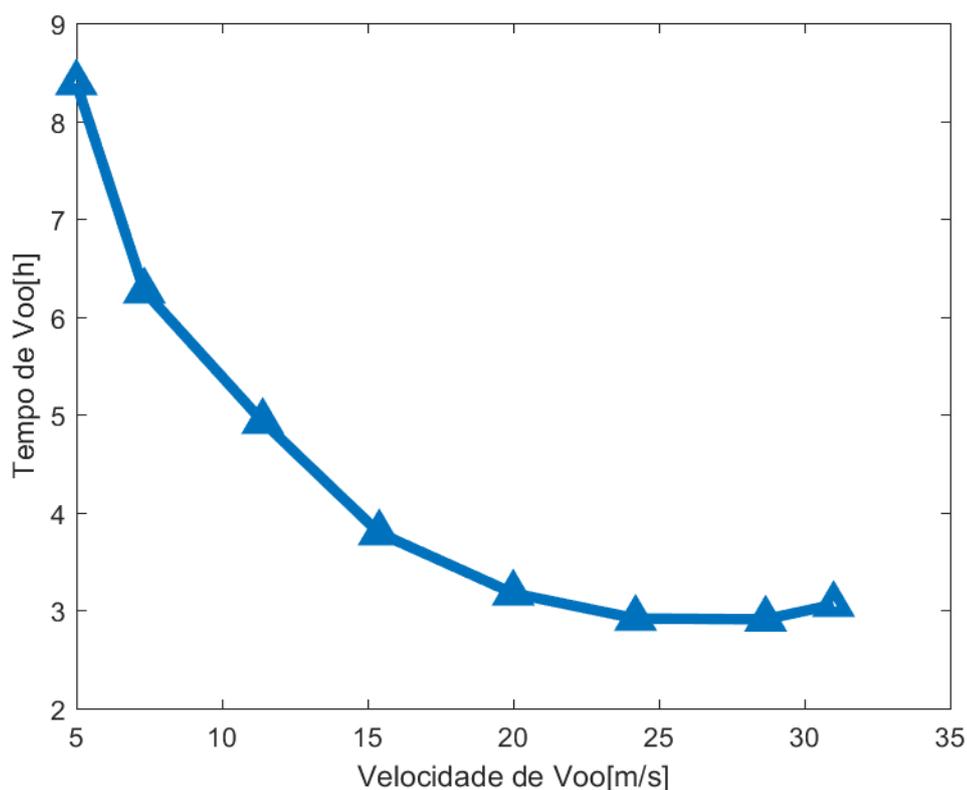


Fonte: Autor

O comportamento representado pela Figura 6.5 se manteve o mesmo para ambas as trajetórias. Isso ocorre pois a quantidade de área pulverizada depende do raio de curvatura,

que por sua vez influência na manobra que será executada, vide seção 4.3. A área pulverizada depende da escolha da manobra que será executada para se evitar o obstáculo, que tanto para *Progressive Pass* quanto *Round Robin*, foi usado a manobra *Gap-turn*, levando assim a mesma quantidade de área pulverizada.

Figura 6.6 – Tempo de Voo X Velocidade de Voo - *Round Robin*.

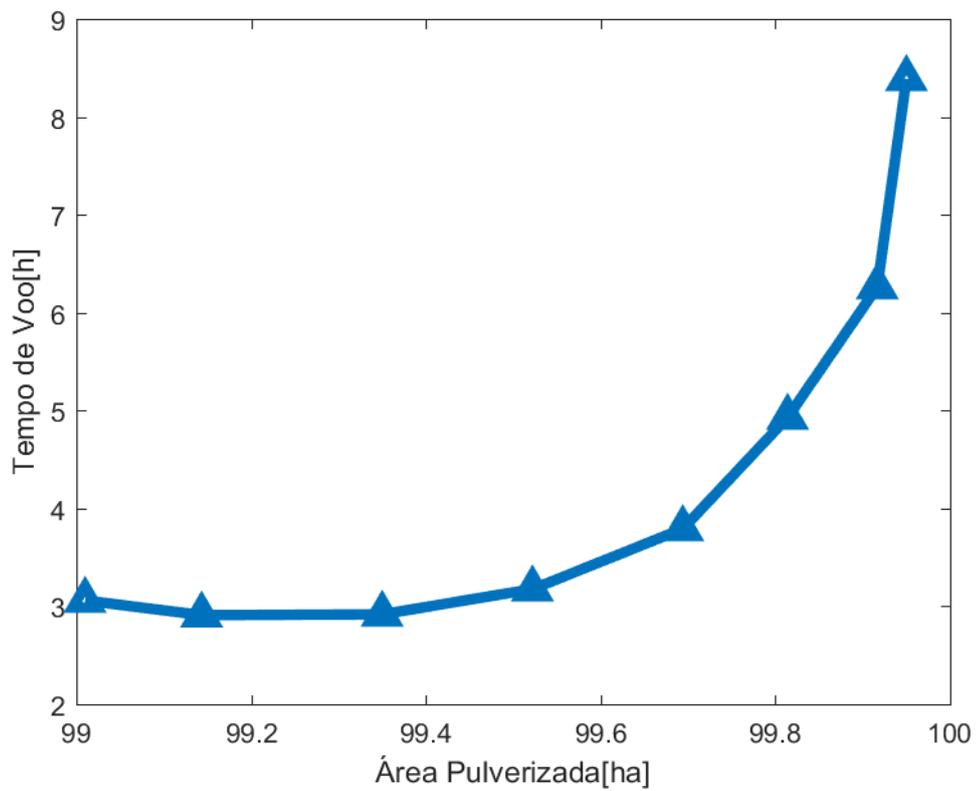


Fonte: Autor

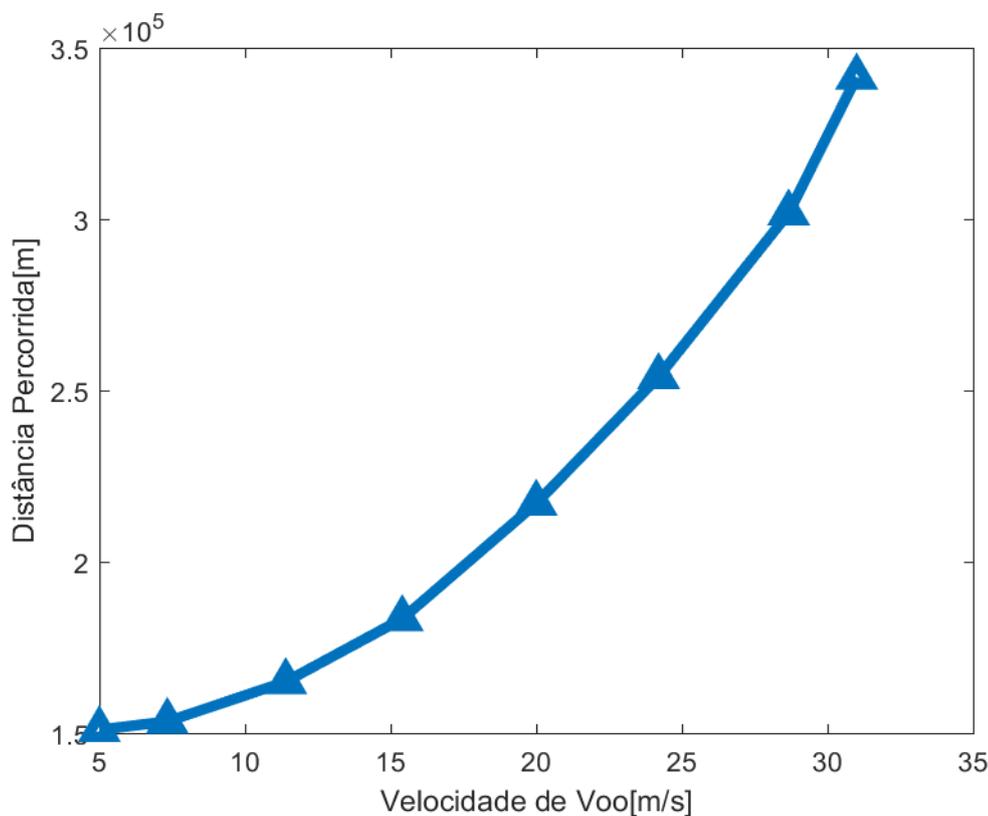
A Figura 6.6 mostra a relação entre o tempo de voo e a velocidade de voo da aeronave em trajetória *round robin*. O comportamento novamente se manteve igual ao do *progressive pass*. O tempo de voo reduziu até uma certa velocidade de voo, e voltou a aumentar. No entanto, para velocidades baixas o tempo de voo foi muito mais elevado quando comparado ao *progressive pass*, e isso é explicado devido as condições de uso para as manobras de balão. Como mostrado na seção 4.3, a manobra em *U-turn* é executada quando a distância d é maior que duas vezes o raio de curvatura. As trajetórias em *round robin*, variam o valor da distância d , que começam com valores altos e vão reduzindo a cada passo da trajetória (Figura 5.9). A variação na distância d , implica na mudança do tipo de manobra que será executada. Ao se trabalhar em velocidade baixa tem-se um raio de curvatura baixo, fazendo que a manobra *U-turn* seja executada mais vezes durante a trajetória.

A manobra *U-turn* é eficaz quando executada no limite de sua restrição, isto é, seu raio de curvatura deve ser grande o bastante para que a manobra se aproxime do formato *Gap-turn*, no qual se tem uma maior eficácia quando se observado em relação a distância percorrida. Portanto, ao se utilizar um raio de curvatura muito baixo, a eficiência da manobra *U-turn* é reduzida, logo aumenta o tempo de voo da aeronave.

Figura 6.7 – Tempo de Voo X Área Pulverizada - *Round Robin*.



Fonte: Autor

Figura 6.8 – Distância Percorrida X Velocidade de Voo - *Round Robin*.

Fonte: Autor

Como observado na Tabela 6.2, o tempo de voo da aeronave foi reduzindo com o aumento do raio de curvatura, isto é, a manobra *U-turn* foi se tornando cada vez mais próximo do *Gap-turn*. No entanto, para velocidades de voo muito elevadas, tem-se novamente o aumento do tempo de voo. Isso ocorre por que o raio de curvatura se tornou tão grande que deixa de cumprir a condição de uso do *U-turn*, e passam a executar a manobra *Omega-turn* que é típica da trajetória em *progressive pass*. Dessa forma, seu comportamento será análogo ao explicado na seção anterior, no qual o aumento da distância percorrida é muito maior que o aumento de velocidade (Figura 6.8), que fará o tempo de voo aumentar.

Novamente não foi preciso realizar simulações para valores de velocidade maiores que 31[m/s], pois a partir da velocidade de 30[m/s] a eficiência da pulverização tende-se reduzir.

6.2 Cenário sem obstáculo

Como pode-se observar, a quantidade de área pulverizada não foi alterada para ambas as trajetórias devido os parâmetros adotados durante a implementação do algoritmo de geração da trajetória em *Progressive Pass* e *Round Robin*. Ambos algoritmos tratam os possíveis obstá-

culos presentes no ambiente da mesma maneira, aplicando a manobra de voo do tipo *Gap-Turn*, sendo essa utilizada devido sua maior eficiência de voo. Logo, a presença de obstáculos não apresentaria dados significantes para comparação e otimização das trajetórias geradas.

Para um processo de pulverização eficiente, deve-se analisar a quantidade de área pulveriza e o tempo de voo gasto durante esse processo. Como já mostrado, a quantidade de área pulverizada não se altera com a variação do tipo de trajetória utilizada. Portanto, o estudo para o cenário sem obstáculo foi direcionado para o tempo de voo da aeronave.

Para o cenário descrito na Seção 5.2, a Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos para as trajetórias em *Progressive Pass* e *Round Robin*.

Tabela 6.3 – Dados obtidos para as trajetórias *Progressive Pass* e *Round Robin* em um cenário sem obstáculos

Cenário sem obstáculo			
Aceleração Máxima= $3g[m/s^2]$; Área total=100[ha]			
Trajетórias	Tempo de voo [h]	Velocidade de voo [m/s]	Distância Percorrida [m]
<i>Progressive Pass</i>	0,804	68	196743,147
<i>Round Robin</i>	0,695	87	258989,059

Fonte: Autor

Novamente a trajetória em *Round Robin* obteve um tempo de voo menor quando comparada ao *Progressive Pass*. Isso ocorre devido os tipos de manobras realizadas em suas respectivas trajetórias.

Como ilustrado na Figura 5.13, a trajetória em *Progressive Pass* apresenta uma distância de retorno sempre fixa, devido a isso é comum o uso da manobra de retorno *Omega-Turn* de maneira repetitiva.

A trajetória em *Round Robin* não apresenta uma distância de retorno fixa, vide a Figura 5.14, a cada passo da pulverização, essa distância de retorno se altera e conseqüentemente modifica o tipo de manobra executada.

Devido a execução contínua e repetitiva da manobra de retorno *Omega-Turn*, que é uma manobra menos eficiente em termos de avanço de área durante a pulverização, a trajetória em *Progressive Pass* apresenta um tempo de voo superior a trajetória em *Round Robin*, no qual realiza a manobra *U-Turn* em maior frequência.

6.2.1 Otimização da trajetória

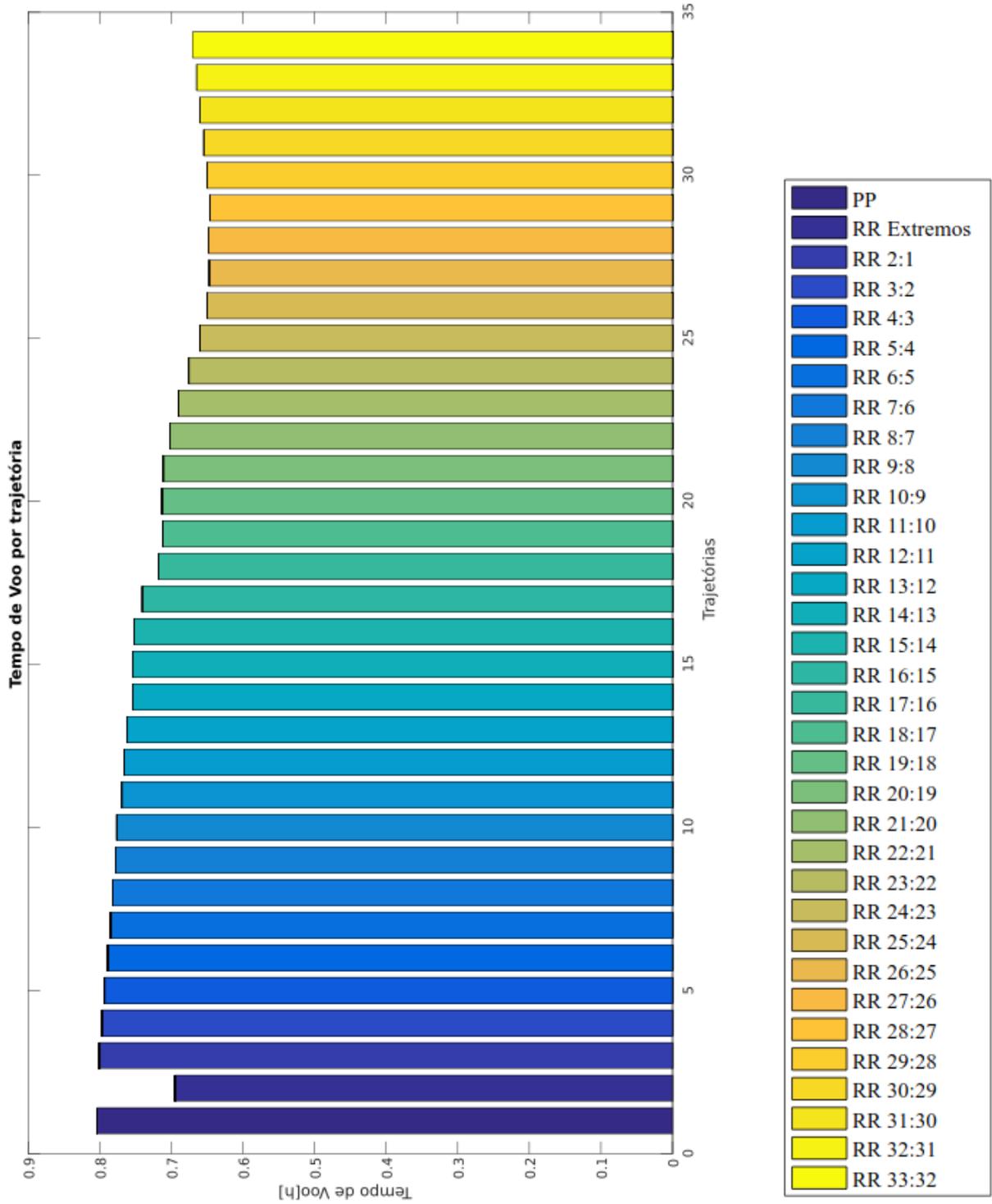
Após se verificar que a trajetória em *Round Robin* apresentava um tempo de voo inferior ao *Progressive Pass* para o cenário de estudo, aplicou-se um algoritmo de otimização para a trajetória em *Round Robin*. Esse algoritmo de otimização se dá através da variação da maneira de execução da trajetória, no qual os resultados são apresentados na Tabela 6.4 e nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11.

Tabela 6.4 – Dados obtidos pelo algoritmo de otimização.

Trajetoárias	Tempo de Voo [h]	Velocidade [m/s]	Distância Percorrida[m]
<i>Round Robin 2:1</i>	0,801	68	196082,366
<i>Round Robin 3:2</i>	0,797	68	195160,073
<i>Round Robin 4:3</i>	0,793	68	194215,297
<i>Round Robin 5:4</i>	0,789	67	190352,395
<i>Round Robin 6:5</i>	0,785	67	189358,482
<i>Round Robin 7:6</i>	0,782	67	188580,515
<i>Round Robin 8:7</i>	0,778	66	184859,017
<i>Round Robin 9:8</i>	0,776	65	181692,429
<i>Round Robin 10:9</i>	0,769	65	180033,528
<i>Round Robin 11:10</i>	0,765	65	179122,260
<i>Round Robin 12:11</i>	0,762	64	175572,461
<i>Round Robin 13:12</i>	0,754	63	171001,979
<i>Round Robin 14:13</i>	0,754	63	170922,398
<i>Round Robin 15:14</i>	0,751	63	170429,093
<i>Round Robin 16:15</i>	0,741	48	127977,942
<i>Round Robin 17:16</i>	0,718	50	129222,396
<i>Round Robin 18:17</i>	0,712	50	128194,344
<i>Round Robin 19:18</i>	0,713	52	133522,729
<i>Round Robin 20:19</i>	0,711	53	135734,707
<i>Round Robin 21:20</i>	0,702	54	136508,527
<i>Round Robin 22:21</i>	0,690	56	139198,627
<i>Round Robin 23:22</i>	0,676	57	138615,120
<i>Round Robin 24:23</i>	0,660	58	137907,036
<i>Round Robin 25:24</i>	0,650	59	137985,954
<i>Round Robin 26:25</i>	0,647	60	139802,668
<i>Round Robin 27:26</i>	0,648	62	144604,367
<i>Round Robin 28:27</i>	0,646	63	146555,884
<i>Round Robin 29:28</i>	0,650	64	149837,842
<i>Round Robin 30:29</i>	0,655	65	153231,271
<i>Round Robin 31:30</i>	0,660	66	156740,366
<i>Round Robin 32:31</i>	0,665	67	160369,317
<i>Round Robin 33:32</i>	0,670	68	164122,319

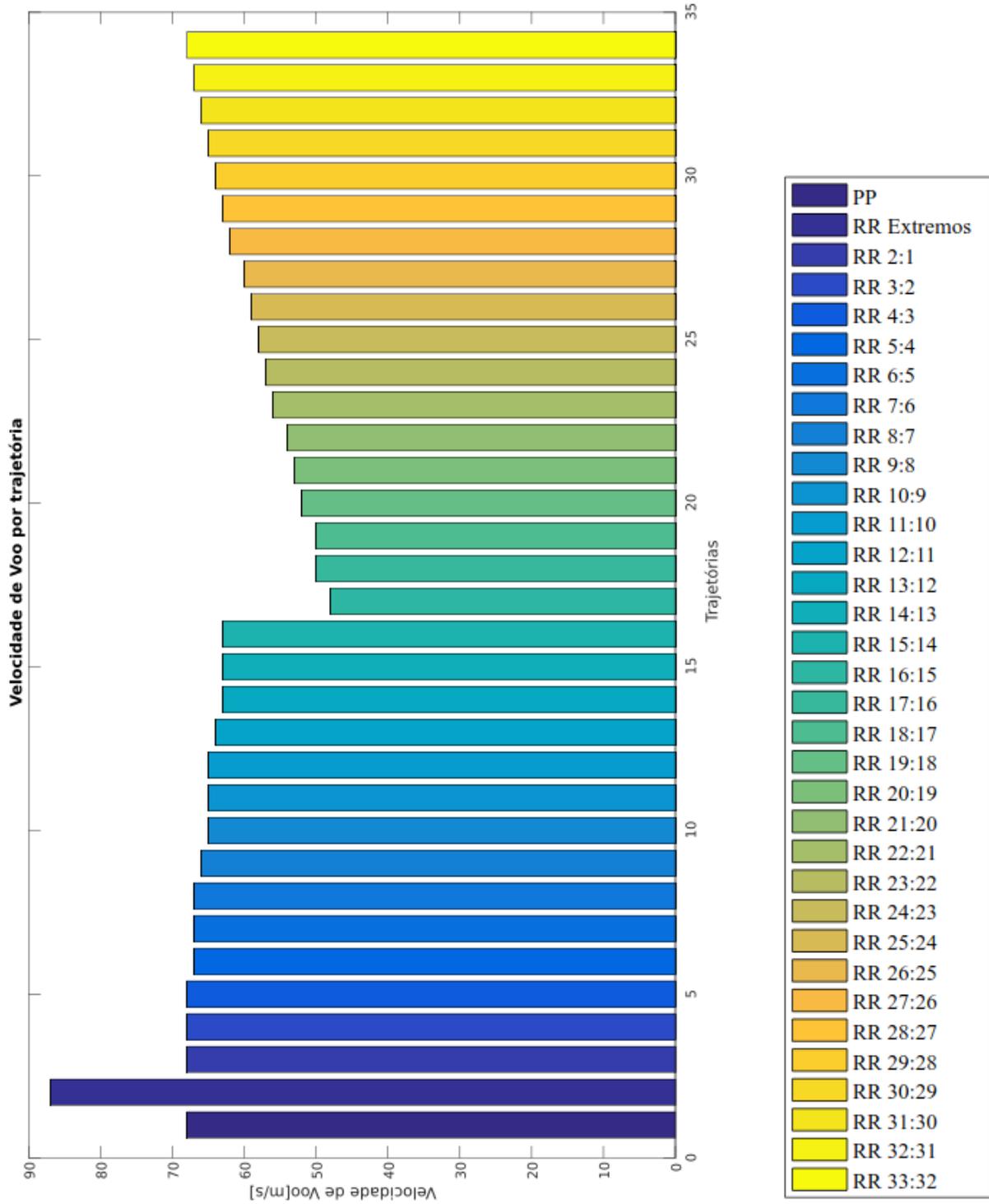
Fonte: Autor

Figura 6.9 – Tempo de Voo por trajetória - Otimização *Round Robin*.



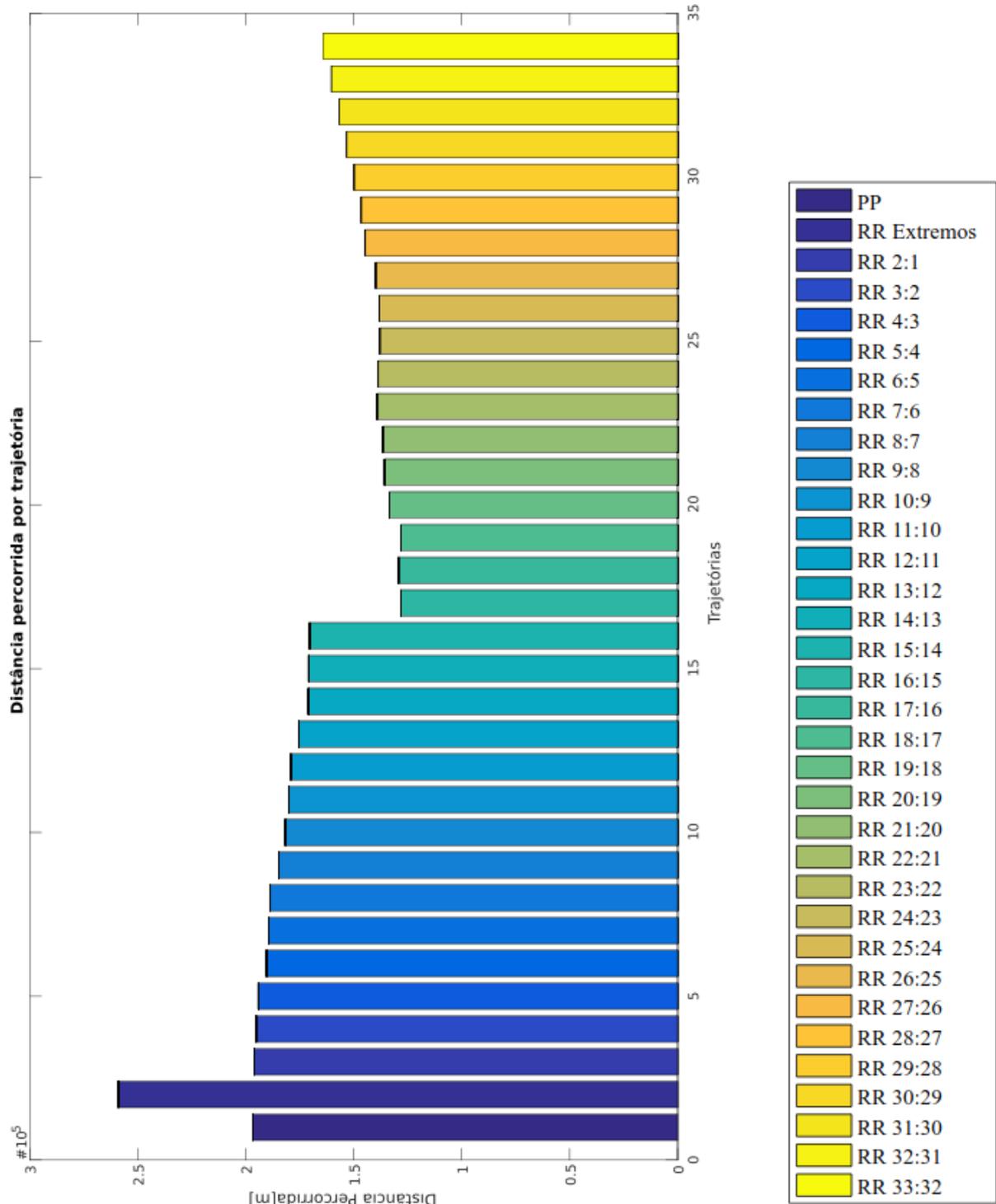
Fonte: Autor

Figura 6.10 – Velocidade de Voo por trajetória - Otimização *Round Robin*.



Fonte: Autor

Figura 6.11 – Distância percorrida por trajetória - Otimização *Round Robin*.



Fonte: Autor

A Tabela 6.4 e a Figura 6.9 mostram que a variação da trajetória *Round Robin* em que foi obtido o menor tempo de voo foi a trajetória *Round Robin* 28:27. Isso ocorre devido as características das manobras de retorno aplicadas durante essa trajetória.

Como já mencionado, a manobra de maior eficiência em termo de avanço durante a pulverização é a *Gap-Turn*. Portanto, quando mais próximo a manobra se aproximar das características do *Gap-Turn* mais eficiente ela será.

A trajetória *Round Robin 28:27* é realizada variando a distância de retorno entre 280[m] na ida e 270[m] na volta. A velocidade que apresentou o menor tempo nesse tipo de trajetória foi a de 63[m/s], portanto o raio de curvatura utilizado segundo a Equação 4.1 é igual a 134,86[m].

O critério de uso da manobra *Gap-Turn* foi apresentado na Seção 4.3.3, no qual a distância de retorno deve ser exatamente igual a duas vezes o raio de curvatura da aeronave. Note que a trajetória *Round Robin 28:27* apresenta distâncias de retorno próximas a duas vezes a seu raio de curvatura (269,72[m]), logo as manobras *U-Turn* são executadas no limite de sua restrição de uso, se aproximando dessa forma da manobra *Gap-Turn*, vide a Seção 4.3.2.

É importante ressaltar que a otimização da trajetória *Round Robin* não reduziu apenas o tempo de voo, mas como também reduziu a velocidade de voo da aeronave, como mostrado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Resultados da otimização.

	<i>Round Robin</i>	<i>Round Robin 28:27</i>	Redução [%]
Tempo [h]	0,695	0,646	7,050
Velocidade [m/s]	87	63	27,586
Distância [m]	258989,059	146555,884	43,412

Fonte: Autor

A redução da velocidade de voo da aeronave implica em um raio de curvatura e manobras de retorno menores, dessa forma resultando em um diferença drástica de 43,412% (112,43[km]) de distância percorrida entre o *Round Robin* otimizado e o normal.

Note que a velocidade de voo também apresentou uma redução significativa de 27,586%. O uso de velocidade de voo baixa é vantajoso em uma pulverização agrícola devido aos seguintes fatores:

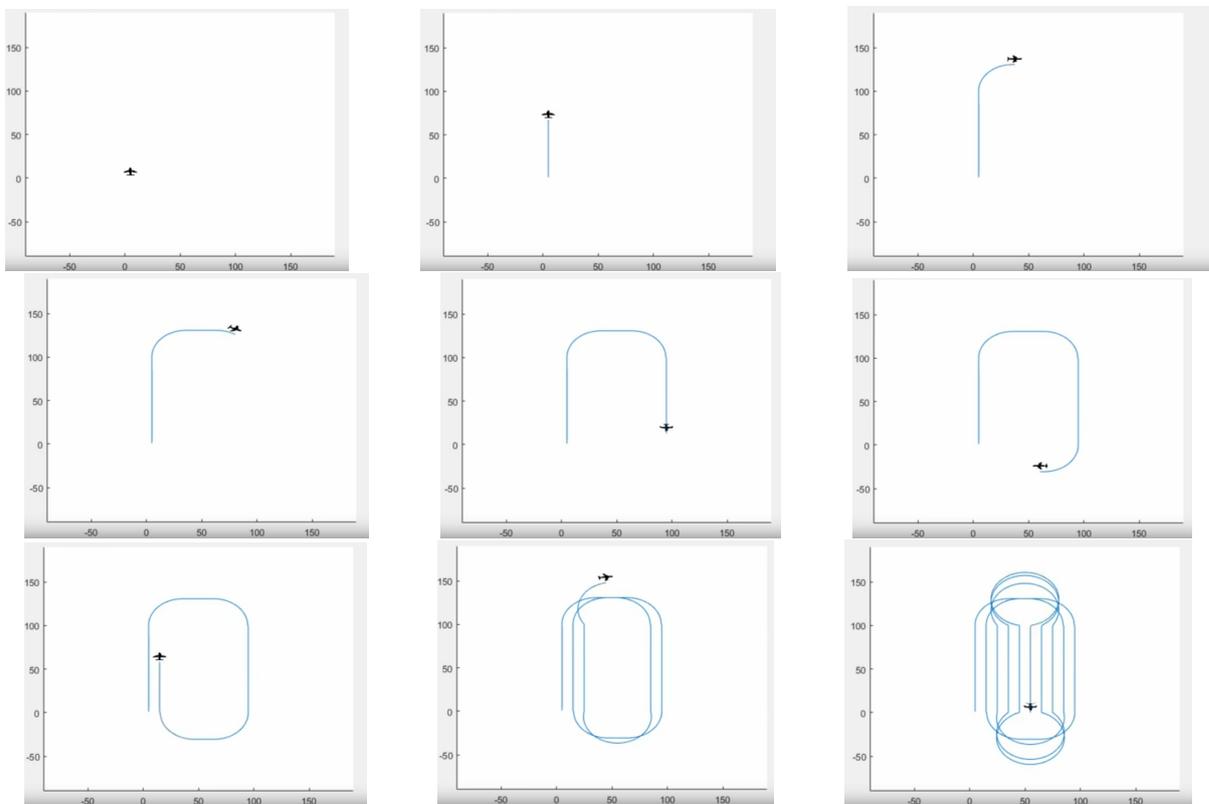
- Reduz o fenômeno da deriva do defensivo;
- Oferece maior controle do VANT, podendo assim acessar áreas de difícil pulverização;
- Reduz a chances de acidentes graves;

- Aumenta a quantidade de defensivo químico transportado pelo VANT, pois reduz a quantidade de combustível necessário para o transporte.

6.2.2 Animação Gráfica

Como forma de verificar o comportamento do VANT durante a pulverização agrícola, foi desenvolvido um algoritmo capaz de criar uma simulação gráfica do processo de pulverização realizado pelas trajetórias geradas. A Figura 6.12 ilustra a animação gráfica gerada para o *Round Robin* Extremos.

Figura 6.12 – Animação gráfica *Round Robin* Extremos.



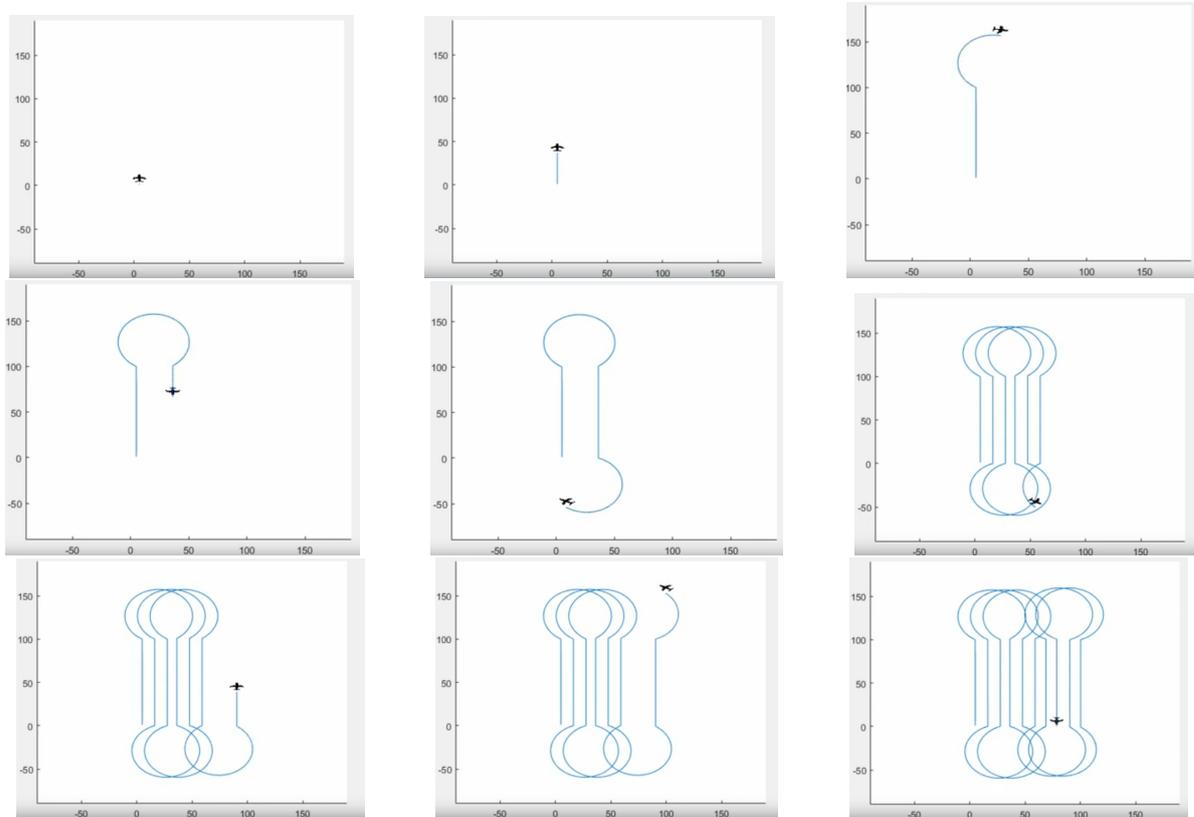
Fonte: Autor

Através da animação gráfica, foi possível certificar que a trajetória está sendo gerada corretamente e o VANT está se comportando como esperado.

Vale ressaltar o algoritmo responsável pela criação da animação suporta diferentes tamanhos de áreas a serem pulverizadas, desde que essas áreas sejam regulares e sem buracos. Portanto, como o intuito é verificar o comportamento do VANT perante a trajetórias trabalhadas, gerou-se a animação para uma área menor do que a área descrita na Seção 5.2 (100[m]X100[m]), afim de se reduzir o tempo de processamento gasto na produção da animação.

A Figura 6.13 demonstra a animação gráfica gerada na trajetória *Round Robin 3:2*.

Figura 6.13 – Animação gráfica *Round Robin 3:2*.



Fonte: Autor

A área trabalhada na simulação da trajetória *Round Robin 3:2* é a mesma da adotada para a animação do *Round Robin Extremos*. Novamente o VANT se comportou como esperado durante a pulverização agrícola.

7 CONCLUSÃO

Para o cenário com a presença de obstáculo, pode-se observar o comportamento do VANT em relação a quantidade de área pulverizada. Como esperado, tanto para a trajetória em *Progressive Pass* quanto para a em *Round Robin*, a quantidade de área pulverizada manteve-se o mesmo padrão. Isso ocorre pois a área pulverizada depende da escolha da manobra que será executada para evitar o obstáculo, em que para ambas as trajetórias é usado a manobra de retorno *Gap-Turn*.

Também pode-se observar que a trajetória em *Progressive Pass* é mais eficiente quando executada em baixas velocidades de voo. Isso se dá pelo fato de que uma baixa velocidade de voo implica em um raio de curvatura menor, reduzindo o raio de curvatura e mantendo fixo a distância de retorno (típico de trajetórias em *Progressive Pass*), a manobra de retorno utilizada se afasta do formato *Omega-Turn* e se aproxima do formato *Gap-Turn*, que é mais eficiente em termos de avanço durante a pulverização.

O inverso se observa para a trajetória *Round Robin*, no qual é mais eficiente quando executada em altas velocidades de voo. Análogo ao que se ocorre a trajetória *Progressive Pass*, ao se aumentar a velocidade de voo, também se aumenta o raio de curvatura da aeronave. Raios de curvatura elevados aumentam a eficiência da manobra de retorno *U-Turn* (comuns nas trajetórias em *Round Robin*) devido o seu formato de execução se aproximar da manobra *Gap-Turn*.

Embora o intuito de análise para o cenário com obstáculo tenha sido a quantidade de área pulverizada, também pode-se notar a relação entre velocidade de voo da aeronave e o tempo gasto para pulverizar, vide a Figura 6.6. No qual pode-se notar que para a pulverização agrícola existe uma velocidade ótima em que o VANT deve operar. Portanto, ao se trabalhar em velocidade baixas o tempo de voo aumenta, porém ao se trabalhar com velocidades muito altas, o tempo de voo também aumenta devido o aumento do raio de curvatura da aeronave. Segundo os parâmetros apresentados na Seção 5.1, observou-se que a trajetória do tipo *Progressive Pass* obteve uma maior eficiência quando a aeronave possui uma velocidade de voo de 20[m/s], enquanto a trajetória em *round robin* sua melhor eficiência está relacionada a uma velocidade de voo de 25[m/s].

Após se observar que a quantidade de área pulverizada não foi alterada para ambas as trajetórias devido aos parâmetros adotados durante a implementação do algoritmo, o presente

trabalho focou o estudo em um cenário sem obstáculos para a análise de outro fator importante para uma pulverização eficiente, o tempo de voo do VANT.

Como mostrado pela Tabela 6.3, a trajetória *Round Robin* apresentou um tempo de voo menor quando comparado ao *Progressive Pass*. Apesar da trajetória *Round Robin* possuir um tempo de voo inferior, sua velocidade de voo ótima resultou em aumento de 62,246[km] de distância percorrida em relação ao *Progressive Pass*, isso implica em um aumento da quantidade de combustível gasto para pulverizar a área. Como forma de atacar esse problema, foi implementado um algoritmo de otimização da trajetória.

O algoritmo de otimização se dá através da variação da maneira de execução da trajetória, afim de se eliminar os tempos improdutivos e possivelmente reduzir a velocidade de voo. Após a otimização da trajetória *Round Robin*, notou-se que a variação em que se teve os melhores resultados foi o *Round Robin 28:27*.

Como já dito na Seção 6.2.1, a trajetória *Round Robin 28:27* é realizada variando sua distância de retorno entre 280[m] na ida e 270[m] na volta. A velocidade ótima de voo para essa trajetória foi de 63[m/s], resultando em um raio de curvatura de 134,86[m]. A manobra de retorno *Gap-Turn* é utilizada quando a distância de retorno deve ser igual a duas vezes ao raio de curvatura e a trajetória *Round Robin 28:27* apresentou distâncias de retorno próximas a duas vezes seu raio de curvatura (269,72[m]). Portanto, as manobras *U-Turn* são executas no limite de sua restrição de uso, se aproximando do formato *Gap-Turn*.

A otimização da trajetória *Round Robin* não melhorou apenas o tempo de voo (redução de 7,050%), como também reduziu a velocidade ótima de operação do VANT (redução de 27,586%) e conseqüentemente reduziu a distância percorrida em 43,412% (112,43[km]) quando se comparado ao *Round Robin* não otimizado.

Essa redução de velocidade de 27,586%, oferece maior controle do VANT durante a pulverização agrícola, podendo assim pulverizar áreas de difícil acesso. O uso de velocidade de voo baixas, reduzem o fenômeno da deriva do defensivo assim como a chances de acidentes graves. Por fim, a velocidade de voo também influencia a magnitude do raio de curvatura, no qual quanto menor for a velocidade de voo, menor será o raio de curvatura, que por sua vez reduzirá a distância percorrida total. Portanto, a redução da distância total percorrida, reduz a quantidade de combustível gasto para realizar a trajetória. Quanto menor for a quantidade de combustível necessário para a trajetória, maior será a quantidade de defensivo químico que o VANT poderá transportar em uma única trajetória.

Ao final, também foi implementado um algoritmo capaz de criar simulações gráficas do processo de pulverização do VANT para as trajetórias geradas. Essa simulação teve por objetivo verificar o comportamento do VANT segundo os parâmetros de análise adotados. Através da animação gráfica, foi possível ter confirmação visual do plano de voo executado pelo VANT.

Como proposta de trabalho futuro, sugere-se que sejam feitas novas simulações para ambientes não regulares, podendo ter presença de obstáculos, conflitos em potencial e ameaças (previsíveis ou não).

Outro ponto a ser aprimorado é o incremento de uma análise econômica adequada. Com a adição de uma análise econômica apropriada, seria possível determinar a quantidade de combustível que é gasto por hora de voo da aeronave (assim como seu respectivo custo) e qual é o ganho em reais por hectare de área pulverizada.

Por fim, sugere-se que no futuro seja implementada uma heurística capaz de gerar a melhor trajetória de voo possível em um ambiente desconhecido, levando em consideração os níveis de altitude da aeronave (discretização 3D), assim como a adição de métodos de discretização mais refinados.

REFERÊNCIAS

- AKESSON, N. B.; YATES, W. E. **The use of aircraft in agriculture**. [S.l.]: Food & Agriculture Org., 1974.
- ANGUS, D. Crowding population-based ant colony optimisation for the multi-objective travelling salesman problem. In: IEEE. **2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making**. [S.l.], 2007. p. 333–340.
- ARKIN, E. M.; HASSIN, R. Approximation algorithms for the geometric covering salesman problem. **Discrete Applied Mathematics**, Elsevier, v. 55, n. 3, p. 197–218, 1994.
- ASAE. Uniform terminology for agricultural machinery management. ASAE S495.1 NOV2005, 2005.
- AUERNHAMMER, H.; MUHR, T.; DEMMEL, M. Gps and dgps as a challenge for environmentally-friendly agriculture. **The Journal of Navigation**, Cambridge University Press, v. 48, n. 2, p. 268–278, 1995.
- BALCH, T. The case for randomized search. In: **Workshop on Sensors and Motion, IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 213–215.
- BASTOS, T. R. **15 usos de drones na agricultura e na pecuária**. 2015. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Pesquisa-e-Tecnologia/noticia/2015/05/15-usos-de-drones-na-agricultura-e-na-pecuaria.html>>. Acesso em: 11 jun. 2019.
- BOCHTIS, D.; VOUGIOUKAS, S. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 101, n. 1, p. 1–12, 2008.
- BONGAARTS, J. Food and agriculture organization of the united nations: the state of food and agriculture: agricultural trade and poverty: can trade work for the poor? **Population and Development Review**, Wiley Periodicals, Inc., v. 33, n. 1, p. 197–198, 2018.
- CAO, Z. L.; HUANG, Y.; HALL, E. L. Region filling operations with random obstacle avoidance for mobile robots. **Journal of Robotic systems**, Wiley Online Library, v. 5, n. 2, p. 87–102, 1988.
- CHOSSET, H. Coverage for robotics—a survey of recent results. **Annals of mathematics and artificial intelligence**, Springer, v. 31, n. 1-4, p. 113–126, 2001.
- GILLETT, B. E.; MILLER, L. R. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. **Operations research**, INFORMS, v. 22, n. 2, p. 340–349, 1974.
- HANSEN, A. C.; HORNBAKER, R. H.; ZHANG, Q. Monitoring and analysis of in-field grain handling operations. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **International conference on crop harvesting and processing**. [S.l.], 2003. p. 66.
- JAVAID, A. Understanding dijkstra algorithm. **SSRN Electronic Journal**, 01 2013.
- KELLER, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 92, n. 1, p. 85–96, 2005.

- LATOMBE, J.-C. Introduction and overview. In: **Robot motion planning**. [S.l.]: Springer, 1991. p. 1–57.
- LI, J.; SUN, X.-x. A route planning's method for unmanned aerial vehicles based on improved a-star algorithm [j]. **Acta Armamentarii**, v. 7, p. 788–792, 2008.
- OKSANEN, T. et al. **Path planning algorithms for agricultural field machines**. [S.l.]: Helsinki University of Technology, 2007.
- ONU. Population division, population estimates and projections section-world population prospects, the 2010 revision. 2012.
- PALMER, R. Optimization of farm field operations. In: **Energy Developments: New Forms, Renewables, Conservation**. [S.l.]: Elsevier, 1984. p. 691–696.
- PALMER, R.; WILD, D.; RUNTZ, K. Efficient path generation for field operations. **Dept. of Computer Science, University of Regina**, 1988.
- PALMER, R.; WILD, D.; RUNTZ, K. Improving the efficiency of field operations. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 84, n. 3, p. 283–288, 2003.
- RASI, J. R. Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em pulverização agrícola. **Pós-graduação em Engenharia Rural da Universidade Federal de Pelotas**, Rio Grande do Sul, 2008.
- ROZA, D. Novidade no campo: Geotecnologias renovam a agricultura. **Revista InfoGEO**, n. 2000.
- RYERSON, A. F.; ZHANG, Q. Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, 2007.
- SABELHAUS, D. et al. Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 116, n. 4, p. 399–409, 2013.
- SØRENSEN, C.; BAK, T.; JØRGENSEN, R. Mission planner for agricultural robotics. **AgEng 2004**, p. 894–895, 2004.
- STOLL, A. Automatic operation planning for gps-guided machinery. **Precision agriculture**. Eds Stafford, J. and Werner, A. **Wageningen: Wageningen Academic Publishers**, p. 657–644, 2003.
- TAYLOR, R. K.; SCHROCK, M. D.; STAGGENBORG, S. A. Extracting machinery management information from gps data. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **2002 ASAE Annual Meeting**. [S.l.], 2002. p. 1.
- TRAVICAR. **Manual Skymap - Guia de aplicação**. [S.l.], 2017. 56–57 p. Disponível em: <<https://travicar.com.br/assets/base/catalogos/CATÁLOGODGPS/PORTUGUÊS/MANUALSKYMAP3.0.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159–163, 2002.

UEYAMA, J.; FAIÇAL, B. S. Drones sobre o campo: avanços tecnológicos ampliam as possibilidades do uso de aeronaves não tripuladas na agricultura. **Revista Pesquisa FAPESP**, n. 239, p. 74–77, 2016.

YANG, H.; ZHAO, Y. Trajectory planning for autonomous aerospace vehicles amid known obstacles and conflicts. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, v. 27, n. 6, p. 997–1008, 2004.

ZANCHIN, B. C. **Análise do algoritmo A* (A estrela) no planejamento de rotas de veículos autônomos**. 2018. Monografia (Bacharel em Engenharia Eletrônica), URCAMP (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), Ponta Grossa, Brazil.